



UNIVERSITÀ DI PISA

Dipartimento di Ingegneria dell'Energia, dei Sistemi,
del Territorio e delle Costruzioni

Corso di laurea magistrale in Ingegneria Elettrica

*Correnti di cuscinetto nei motori-AC
alimentati con inverter*

CANDIDATO: Tiziano Vanni

RELATORE: Prof. Luca Sani

ANNO ACCADEMICO 2013/2014

INDICE GENERALE

1. Introduzione

2. Fisica delle correnti di cuscinetto

- 2.1 “Classiche” correnti di cuscinetto
- 2.2 Comportamento ohmico e capacitivo di un cuscinetto volvente
- 2.3 Capacità del motore e rapporto di tensione del cuscinetto
- 2.4 Correnti di cuscinetto indotte dall’inverter

3. Tecniche per la misura dei parametri correlati alle correnti di cuscinetto

- 3.1 Introduzione
- 3.2 Preparazione del motore per la valutazione della corrente di cuscinetto

4. Modellazione dei sistemi di azionamento per la determinazione delle correnti di cuscinetto

- 4.1 Calcolo e misura delle capacità parassite e BVR
- 4.2 Correnti di scarica (EDM)
- 4.3 Correnti circolanti

5. Correnti di cuscinetto e di terra nei sistemi di azionamento

- 5.1 Influenza delle dimensioni e velocità del motore e della temperatura di cuscinetto
- 5.2 Influenza delle combinazioni inverter-motore
- 5.3 Influenza della frequenza di commutazione
- 5.4 Influenza del tipo di cavo (schermato/non schermato)
- 5.5 Influenza della lunghezza del cavo del motore
- 5.6 Influenza della configurazione di messa a terra

6. Influenza delle tecniche di attenuazione comuni

- 6.1 Rassegna delle principali tecniche di attenuazione
- 6.2 Funzione di base dei filtri
- 6.3 Influenza dei filtri
- 6.4 Influenza dei cuscinetti isolati
- 6.5 Influenza dei cuscinetti ibridi

7. Tecniche di attenuazione innovative

- 7.1 Applicazione della dissipazione di carica statica per attenuare le correnti di scarica EDM
- 7.2 Schermatura elettrostatica parziale per la mitigazione delle correnti di cuscinetto
- 7.3 Prevenzione delle correnti EDM attraverso schermi elettrostatici nella sporgenza dell’avvolgimento di statore
- 7.4 Filtro EMI passivo per eliminare sia le correnti di cuscinetto che le correnti di terra

8. Regole pratiche per la valutazione della corrente di cuscinetto

9. Conclusioni

Bibliografia

1. INTRODUZIONE

Oggi più del 60% dell'energia mondiale è utilizzata per azionare i motori elettrici.

Per quanto riguarda le crescenti richieste di controllo della velocità, gli inverter PWM (Pulse Width Modulated) sono sempre più utilizzati negli azionamenti a velocità variabile; quelli più moderni utilizzano apparecchiature di commutazione rapida, principalmente IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistors).

I sistemi di azionamento convenzionali (funzionanti in linea) hanno basse perdite, basso rumore e coppia liscia, tuttavia, ruotano a velocità costante.

I sistemi di azionamento funzionanti con inverter, al contrario, consentono velocità variabile e quindi risparmio energetico rispetto a quelli convenzionali. Eppure, a basse frequenze, questi sistemi di azionamento soffrono perdite addizionali rispetto alla velocità nominale del motore, rumore aggiuntivo e ripple di coppia ed hanno scarse prestazioni dinamiche. Il funzionamento del motore con frequenze di commutazione più elevate può ridurre queste perdite ed i ripple migliorando le dinamiche di azionamento.

Come mostrato in Fig.1, un moderno azionamento elettronico di potenza è composto da un filtro, un raddrizzatore, un condensatore (link DC), un inverter ed un motore AC.

Esistono molti piccoli accoppiamenti capacitivi nei sistemi di azionamento del motore che possono essere trascurati nell'analisi in bassa frequenza ma le condizioni sono completamente diverse alle alte frequenze. Infatti, a frequenze di commutazione più elevate viene creato un percorso a bassa impedenza per far passare la corrente attraverso questi condensatori. La Fig. 2 mostra gli accoppiamenti capacitivi di un motore ad induzione ed una vista della cava di statore, dove C_{WR} è l'accoppiamento capacitivo tra l'avvolgimento di statore ed il rotore, C_{WS} è l'accoppiamento capacitivo tra l'avvolgimento di statore e lo statore, C_{RS} è l'accoppiamento capacitivo tra il rotore ed il telaio di statore.

In un inverter di potenza trifase, la tensione DC viene convertita in tre tensioni di fase con 120° di sfasamento. La Fig. 3 mostra un inverter fonte di tensione trifase con le tipiche tensioni di fase e di punto neutro (centro stella) che è diversa da zero ed è chiamata tensione di modo comune.

La tendenza all'aumento della frequenza di commutazione migliora la qualità della forma d'onda di corrente nei sistemi di azionamento del motore ma a causa del breve tempo di commutazione, viene prodotta un'alta dv/dt ai terminali del motore. Un esempio degli effetti di un'elevata dv/dt e la conseguente corrente di dispersione viene dato in Fig. 4.

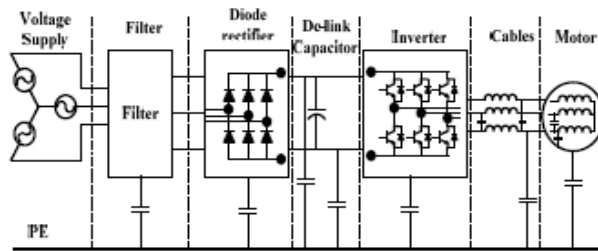


Fig. 1: moderno sistema di azionamento elettronico di potenza

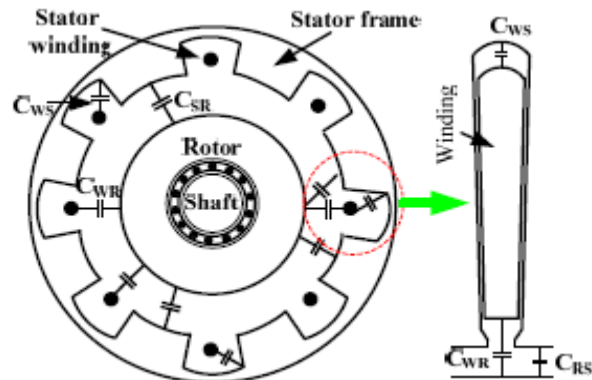


Fig. 2: capacità di accoppiamento in un motore ad induzione e vista di una cava di statore

Secondo la Fig. 3 le tensioni di uscita di un convertitore di potenza (V_a, V_b, V_c) non sono le tensioni di fase. Le tensioni di fase sul carico ed una tensione di modo comune (V_n) possono essere derivate basandosi sulle tensioni del convertitore di potenza. Ogni ramo di tensione di un inverter trifase è:

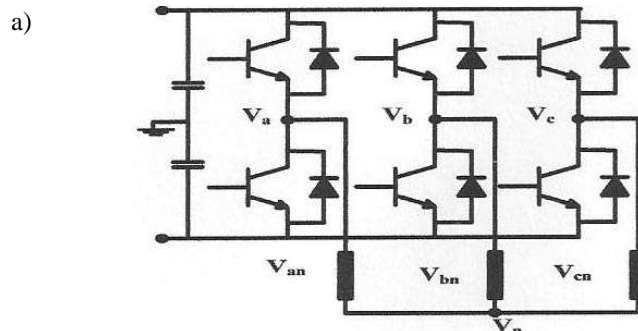
$$\begin{aligned} V_a &= V_{an} + V_n \\ V_b &= V_{bn} + V_n \\ V_c &= V_{cn} + V_n \end{aligned}$$

E quindi:

$$V_a + V_b + V_c = (V_{an} + V_{bn} + V_{cn}) + 3V_n$$

E' chiaro che: $V_{an} + V_{bn} + V_{cn} = 0$

Così la tensione di modo comune può essere calcolata come: $V_n = (V_a + V_b + V_c)/3$



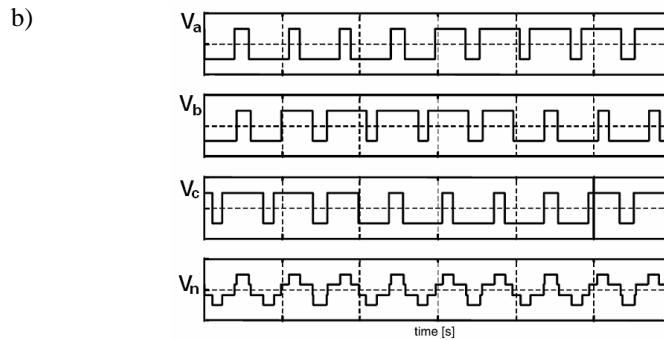


Fig. 3: a) inverter fonte di tensione trifase; b) generazione della tensione di modo comune

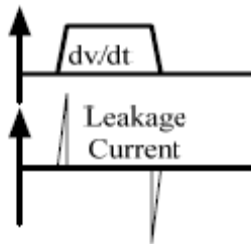


Fig. 4: esempio tipico di alta dv/dt e conseguente corrente di dispersione creata da un elevato stress di tensione durante il periodo di commutazione

L'elevata dv/dt e la tensione di modo comune (V_n o v_{com}) generati da un inverter PWM nelle applicazioni in alta frequenza possono causare alcuni problemi indesiderati come:

- corrente di fuga verso terra attraverso capacità parassite all'interno del motore
- tensione sull'albero e conseguenti correnti di cuscinetto
- disturbi conduttivi e radiati
- sovratensioni ai terminali del motore

Come suddetto, una tensione di modo comune è presente sull'uscita di un inverter trifase.

Questa tensione e i transitori di commutazione rapida (elevata dv/dt) possono causare correnti di cuscinetto nel motore che sono capaci di distruggere i cuscinetti (a seconda del sistema) entro un breve periodo di funzionamento.

I fenomeni delle correnti addizionali di cuscinetto indotte da un inverter nei sistemi di azionamento a velocità variabile dovute alla commutazione rapida della tecnologia IGBT sono stati studiati da circa 10 anni.

Dopo una descrizione fisica dei differenti fenomeni che si verificano, vediamo quali sono le tecniche di misura utilizzate e quindi quali modelli sono proposti per fornire spiegazioni fisiche ed il loro impatto sui fenomeni di corrente di cuscinetto.

I modelli identificano i parametri che sono sensibili per il verificarsi di questi eventi e la loro grandezza.

Inoltre, vengono riportati risultati di studi che sono stati effettuati nel corso degli ultimi anni ed un'analisi derivante da una ricerca di laboratorio che mostra l'influenza qualitativa e quantitativa di diversi parametri nelle stesse identiche condizioni su motori di potenza nominale fino a 500kW. I parametri esaminati sono dimensione e velocità del motore, temperatura di cuscinetto, combinazioni inverter-motore, tipo di cavo del motore e lunghezza, funzionamento con filtri e con l'utilizzo di cuscinetti isolati e cuscinetti ibridi. I risultati mostrano che l'importanza dei differenti fenomeni di corrente di cuscinetto varia con le dimensioni del motore e le configurazioni di messa a terra. Di conseguenza devono essere scelte selettivamente anche diverse tecniche di attenuazione/mitigazione che sono applicate per ridurre o eliminare questo tipo di correnti. In aggiunta, viene fornita una descrizione ed una valutazione di tecniche di attenuazione alternative/innovative.

Tuttavia, una modellazione dettagliata può non sempre essere applicabile con pratiche applicazioni sul campo dove molti parametri potrebbero essere sconosciuti. Perciò viene proposto un diagramma di flusso per stimare il danneggiamento dovuto alle correnti di cuscinetto indotte da un inverter, dove appunto la conoscenza dei diversi parametri di progetto non è disponibile. Questo diagramma potrebbe servire come uno strumento per gli ingegneri per valutare il danneggiamento di un sistema di azionamento; esso riassume anche possibili tecniche di attenuazione per prevenire danni.

2. FISICA DELLE CORRENTI DI CUSCINETTO

2.1 “Classiche” correnti di cuscinetto

Il fenomeno delle correnti di cuscinetto in macchine elettriche funzionanti in linea, denominate anche “classiche” correnti di cuscinetto, era già stato rilevato dal 1920.

Queste correnti sono un effetto parassita e sono principalmente causate da asimmetrie magnetiche nella macchina (eccentricità del rotore, proprietà direzionali dei materiali magnetici...).

Le asimmetrie sono la causa di un collegamento di flusso magnetico parassita alternato nel loop “alloggio di statore – cuscinetto drive-end – albero del motore – cuscinetto non-drive end” che induce una tensione in questo loop. In questo modo, la tensione alternata sull’albero v_{sh} può essere misurata tra le due estremità come parte di questo loop (Fig. 2.1).

Tale tensione indotta può causare una corrente circolante sul cuscinetto che può scorrere solo se il valore di questa tensione supera la soglia del film di lubrificazione isolante del cuscinetto. La soglia per il verificarsi di questa corrente è tipicamente $v_{sh,rms} \approx 350$ mV (Fig. 2.2).

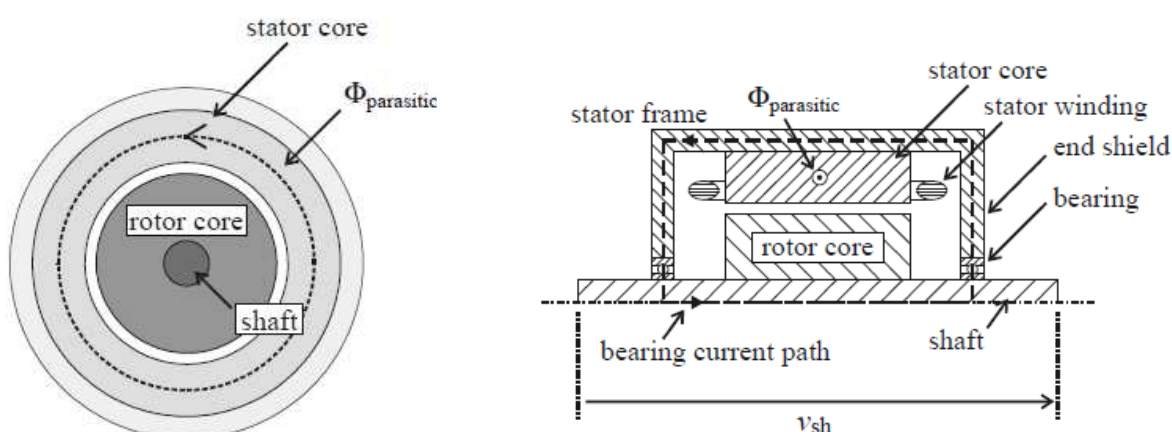


Fig. 2.1: correnti di cuscinetto dovute alle asimmetrie magnetiche nella macchina

Con l’aumento delle dimensioni del motore è più probabile che si verifichino queste correnti perché il collegamento di flusso parassita aumenta.

Isolando ad esempio il cuscinetto non-drive end queste correnti circolanti possono essere sopresse. Tuttavia, di solito si verificano con motori grandi con altezze dell’albero elevate.

La tensione v_{sh} dovuta alle asimmetrie magnetiche varia con la tensione di statore e l’utilizzazione del motore. Le “classiche” correnti di cuscinetto di tipo circolante sono di natura induttiva.

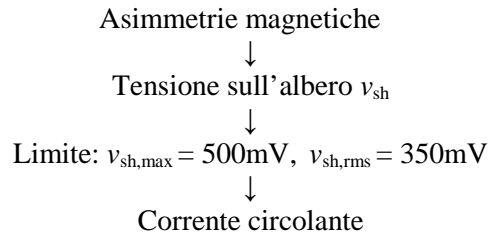


Fig. 2.2: correnti di cuscinetto in macchine funzionanti in linea

Quando le macchine sono alimentate da un inverter possono verificarsi diversi tipi di correnti di cuscinetto. Questa tesi si concentra sulle correnti di cuscinetto indotte da un inverter.

2.2 Comportamento ohmico e capacitivo di un cuscinetto volvente

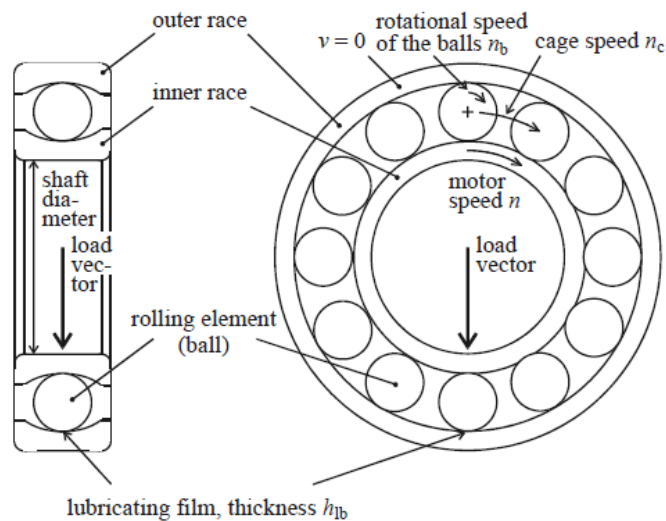


Fig. 2.3: bozza di un cuscinetto a sfere

Il sistema del cuscinetto è composto da due anelli (guide), uno più esterno ed uno più interno, tra i quali vi sono elementi rotanti (qui sfere) immersi in un lubrificante. Quest'ultimo gioca un ruolo importante nella vita del cuscinetto:

- forma una pellicola tra tutte le parti del cuscinetto, per evitare contatto metallico tra elementi rotanti e guide;
- diminuisce l'attrito;
- protegge da corrosione ed umidità.

Lo spessore del film è determinato dalle leggi dell'idrodinamica e dipende dai parametri operativi del motore e dalle proprietà meccaniche del grasso del cuscinetto.

In figura sono mostrati anche il vettore di carico e la velocità di rotazione dei diversi elementi. Il cuscinetto è un'impedenza non lineare complessa nel circuito equivalente del motore.

Da un punto di vista semplificato, possono essere distinti due tipi di funzionamento che sono importanti per la comprensione dei meccanismi delle correnti addizionali di cuscinetto con alimentazione tramite inverter:

→ All'arresto e basse velocità del motore (tipicamente $n \leq 100$ / min), il film di lubrificazione nella zona di carico del cuscinetto è spesso solo alcuni nm. Se la tensione è applicata ai capi del cuscinetto, gli elettroni di conduzione possono facilmente attraversare questo sottile strato isolante. In questo intervallo, il cuscinetto agisce come una *resistenza ohmica*. In tale punto di funzionamento, l'area di contatto locale è relativamente grande. Per cui, i cuscinetti all'arresto possono essere esposti a correnti relativamente grandi senza essere danneggiati.

→ A velocità del motore più elevate ($n \geq 100$ / min), a causa degli effetti idrodinamici, il film lubrificante del cuscinetto è molto più spesso di quello alla fermata (più di 100 volte), di solito nell'intervallo $(0.1...2) \mu\text{m}$. Questo film ha proprietà isolanti ed il cuscinetto agisce come un *condensatore*. A causa della rugosità superficiale e della presenza di particelle metalliche dovute all'usura metallica, il film di lubrificazione può essere forato in modo statistico.

2.3 Capacità del motore e rapporto di tensione del cuscinetto

Differenti capacità all'interno della macchina che non influenzano il funzionamento della linea si manifestano quando la macchina è sottoposta ad una tensione di modo comune v_{com} che contiene componenti in alta frequenza (Fig. 2.4). Al film lubrificante intatto del cuscinetto, che isola il rotore dal ferro di statore, le capacità tra l'avvolgimento di statore ed il rotore, tra rotore e telaio e del cuscinetto sul non drive-end (NDE) e drive-end (DE), $C_{\text{wr}}, C_{\text{rf}}, C_{\text{b,NDE}} \approx C_{\text{b,DE}} \approx C_{\text{b}}$ formano il partitore di tensione capacitivo BVR.

La tensione di modo comune in alta frequenza ai terminali di statore v_{com} è rispecchiata sul cuscinetto attraverso questo partitore di tensione, causando una tensione di cuscinetto v_{b} .

L'espressione analitica per il BVR come una funzione delle diverse capacità è data da (Fig. 2.5):

$$\text{BVR} = \frac{v_{\text{b}}}{v_{\text{com}}} = \frac{C_{\text{wr}}}{C_{\text{wr}} + C_{\text{rf}} + 2C_{\text{b}}} \quad (2.1)$$

I valori del BVR generalmente sono dati come valori percentuali.

E' importante notare che le capacità tra l'avvolgimento di statore e telaio e tra le fasi degli avvolgimenti di statore, C_{wf} e C_{ph} , non influiscono sul suo valore.

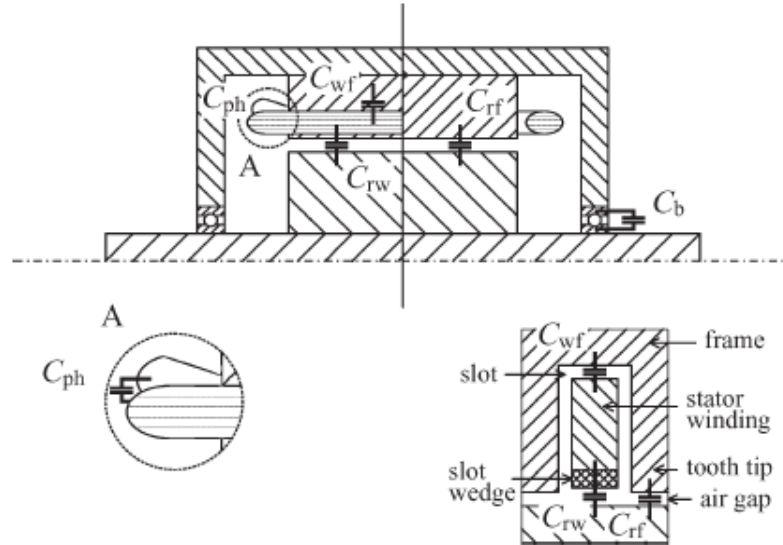


Fig. 2.4: principali capacità di un motore ad induzione (o macchina sincrona) che sono importanti alle alte frequenze

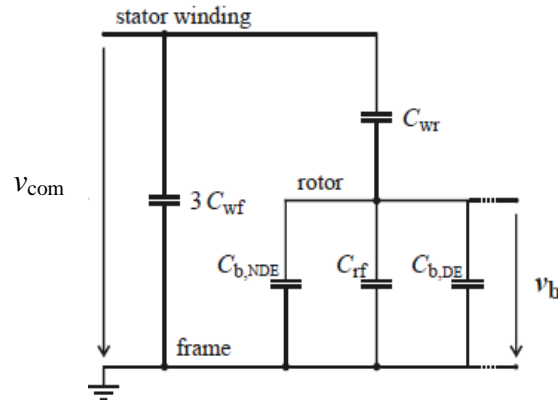


Fig. 2.5: circuito equivalente delle capacità di una macchina ad induzione per la determinazione del BVR

Le cinque più importanti capacità di accoppiamento sono date dalle seguenti parti di una macchina:

► *capacità tra l'avvolgimento di statore e telaio C_{wf} :*

La capacità tra avvolgimento di statore e telaio della macchina è la capacità tra l'avvolgimento di statore ad alta tensione ed il ferro di statore al potenziale di terra. I diversi livelli di tensione sono separati attraverso un isolamento elettrico tra l'avvolgimento di rame e il pacco in ferro di statore. Questa capacità è definita come la capacità tra l'avvolgimento di statore e telaio *per fase*.

► *capacità fase-fase C_{ph} :*

Le capacità fase-fase sono formate principalmente dalle parti degli avvolgimenti delle diverse fasi U, V e W nella sporgenza dell'avvolgimento, dove sono separate solo da una carta d'isolamento speciale.

► *capacità tra l'avvolgimento di statore e rotore C_{wr} :*

La capacità tra l'avvolgimento di statore ed il rotore è data dalla distanza di apertura tra la superficie di rotore e l'avvolgimento di statore, essendo separati attraverso l'isolamento dell'avvolgimento, cunei di cava e traferro.

E' definita come la capacità *per tutte le tre fasi in parallelo*.

► *capacità tra rotore e telaio C_{rf} :*

La capacità tra rotore e telaio è determinata principalmente attraverso la superficie di rotore e la superficie del pacco in ferro di statore al traferro racchiuso nel telaio della macchina, in particolare le punte dei denti di statore.

► *capacità del cuscinetto C_b :*

Al film lubrificante intatto, il che significa che questo ha proprietà isolanti, il cuscinetto agisce come un condensatore con la capacità C_b .

Il calcolo analitico delle capacità ed un confronto con i risultati di misura viene dato nel Cap.4.

2.4 Correnti di cuscinetto indotte dall'inverter

Nella maggior parte dei casi i cuscinetti si rompono per cause meccaniche o termiche (disallineamento del motore rispetto al carico, vibrazioni, scorretta lubrificazione, eccessivo carico radiale o assiale, contaminazione del lubrificante, manutenzione inadeguata...).

Esiste una frazione di rotture (circa il 40%) che avviene per cause elettriche: la corrente che scorre attraverso i cuscinetti li può portare ad una rottura prematura. Come visto in precedenza, inizialmente si attribuivano tali rotture alle asimmetrie magnetiche nella costruzione della macchina.

Con lo sviluppo degli azionamenti con inverter PWM il problema dei cuscinetti si è aggravato.

I fenomeni delle correnti addizionali di cuscinetto nei sistemi a velocità variabile dovuti alla commutazione rapida degli IGBT sono stati riportati da diversi autori sin dalla metà degli anni 90.

L'origine di queste correnti è la tensione di modo comune v_{com} , ovvero la tensione nel sistema di fase omopolare dell'inverter di alimentazione. I tempi di salita t_r degli IGBT sono brevi, tipicamente $t_r =$ alcuni 100 ns, conducendo ad elevate $dv/dt = (2...10)$ kV/ μ s. Come visto in precedenza, le componenti in alta frequenza di questa tensione interagiscono con le capacità parassite della macchina che non sono di influenza al funzionamento della linea.

Possono essere distinte quattro tipi di correnti di cuscinetto:

→ le prime due sono correlate all'influenza della tensione di modo comune v_{com} sulla tensione del cuscinetto v_b ;

→ le ultime due sono causate da correnti di modo comune in alta frequenza i_{com} (o di terra i_g) che derivano dall'interazione di v_{com} con un'elevata dv/dt e la capacità tra l'avvolgimento di statore e telaio del motore C_{wf} (Fig. 2.7).

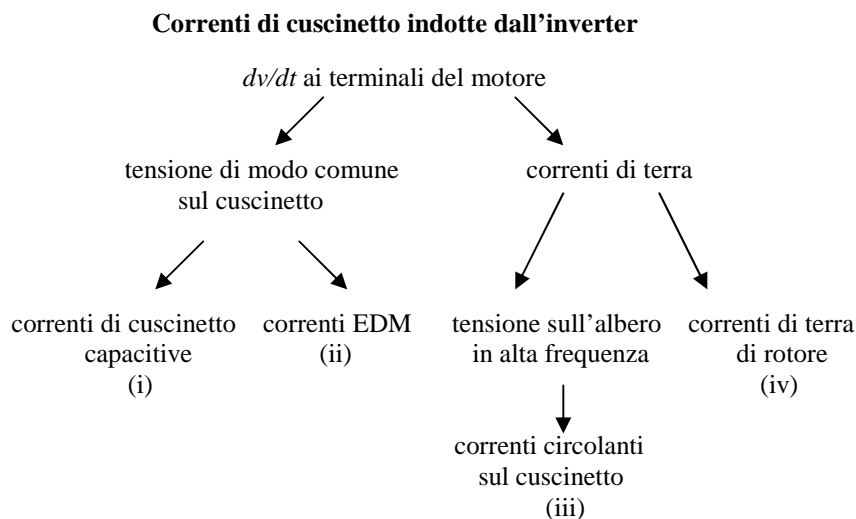


Fig. 2.7: classificazione dei diversi tipi di correnti di cuscinetto indotte da un inverter

(i) Correnti di cuscinetto capacitive

La tensione di modo comune v_{com} sugli avvolgimenti statorici provoca – a causa del partitore di tensione delle capacità della macchina – una caduta di tensione v_b ai capi del cuscinetto tra l’anello interno ed esterno.

- A basse temperature del cuscinetto ($\theta_b \approx 25^\circ\text{C}$) e velocità del motore $n \geq 100 / \text{min}$ il film isolante lubrificante e le sfere e gli anelli del cuscinetto formano una capacità (\rightarrow Par. 2.2).

La dv/dt sul cuscinetto insieme con la capacità del cuscinetto C_b causa piccole correnti capacitive nell’intervallo di $i_{b, \text{cap}, \text{max}} = (5 \dots 10) \text{ mA}$ (Fig. 2.8).

$$i_b = C_b \cdot \frac{dv_b}{dt} \quad (2.2)$$

- Alle temperature del cuscinetto tipiche per il funzionamento a carico, $\theta_b \approx (70 \dots 90)^\circ\text{C}$ e/o basse velocità del motore, $n \leq 100 / \text{min}$, il film lubrificante del cuscinetto può essere colmato dal contatto metallico e non ha più proprietà isolanti.

Quindi, il cuscinetto è una resistenza ohmica. La tensione di modo comune causa piccole correnti di cuscinetto con ampiezze $i_{b, \text{cap}, \text{max}} \leq 200 \text{ mA}$.

Questo tipo di corrente *non è pericolosa per i cuscinetti* poiché è troppo piccola; infatti non è ulteriormente discussa, a causa della sua ampiezza molto più bassa quando è confrontata con gli altri tipi di corrente di cuscinetto.

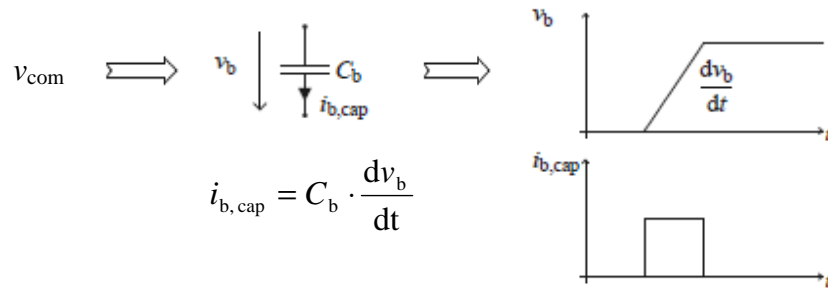


Fig. 2.8: correnti di cuscinetto capacitive (caratterizzate da piccole ampiezze, ordine dei mA)

(ii) Correnti di scarica elettrostatica (EDM)

Come citato precedentemente, nel caso di film di lubrificazione intatto la tensione del cuscinetto v_b rispecchia la tensione di modo comune ai terminali di statore v_{com} ($\theta_b \approx 25^\circ\text{C}$, velocità del motore $n \geq 100/\text{min}$) attraverso il partitore di tensione capacitivo BVR (rapporto di tensione del cuscinetto). Quindi la tensione v_b è determinata da:

$$v_b = \text{BVR} \cdot v_{com} \quad (2.3)$$

Le sfere dei cuscinetti non sono in contatto elettrico con gli anelli, poiché il lubrificante utilizzato ha un parziale effetto isolante perciò si accumula carica sull'apparato di rotore.

Il film lubrificante elettricamente caricato tra sfere e superfici di rotolamento si guasta quando viene superata la tensione di soglia del film $v_{b,th}$ ($\approx 5...30$ V, a seconda delle condizioni di funzionamento del motore) (Fig. 2.9). Il risultato è una ripetuta corrente di scarica, che nel tempo può danneggiare le superfici dei cuscinetti a causa dell'effetto EDM (electric discharge machining), provocando scanalature sugli anelli (fluting).

Questi guasti si verificano in maniera statisticamente distribuita, indipendentemente dagli istanti di commutazione e sono influenzati dalle particelle metalliche dovute all'usura nel grasso. Il primo segnale di deterioramento infatti sarà il rumore ai cuscinetti, poiché l'attrito aumenta e vengono liberate particelle metalliche nel film lubrificante.

Questo effetto è indipendente dalla dv/dt e porta alla distruzione del cuscinetto entro pochi mesi di utilizzo dell'azionamento a velocità variabile. E' dannoso specialmente per motori di piccola potenza e le ampiezze di picco sono $i_{bEDM, max} \approx (0.5...3)$ A.

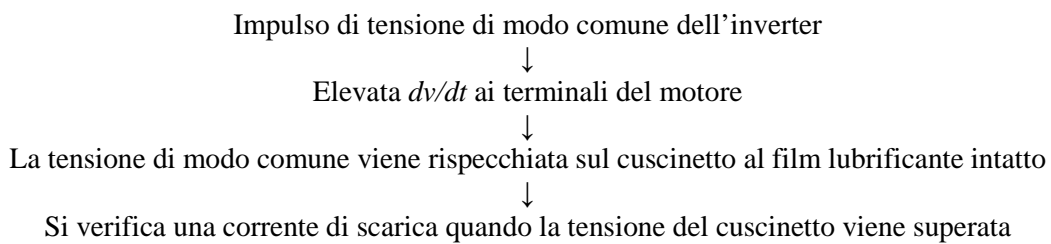


Fig. 2.9: meccanismo delle correnti di cuscinetto EDM (caratterizzate da ampiezze $i_{b max} \approx (0.5...3)$ A)

(iii) *Correnti circolanti sul cuscinetto*

L'elevata dv/dt ai terminali del motore prodotta dall'inverter causa – principalmente per la capacità tra l'avvolgimento di statore e telaio C_{wf} – una corrente di modo comune (di terra) addizionale i_{com} .

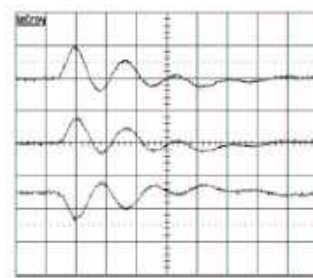
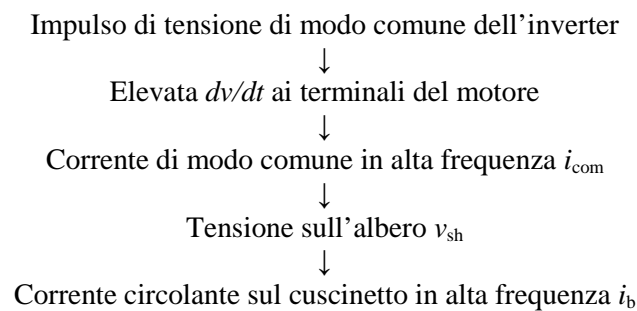
La frequenza di queste correnti varia da 100 kHz fino ad alcuni MHz.

Questa corrente eccita un flusso magnetico circolare Φ_{circ} intorno all'albero del motore che (variando nel tempo) induce una tensione in alta frequenza v_{sh} tra i cuscinetti lungo l'albero.

In presenza del film di lubrificazione elettricamente isolante il cuscinetto agisce come un condensatore; con l'intensità di campo elettrico al guasto del lubrificante di approssimativamente $10,...,15$ V/ μm , la tensione di soglia del cuscinetto è minore di 1-30 V per i tipici spessori minimi del film lubrificante compresi tra 0.1 e 2 μm . Questo valore può facilmente essere superato dalla tensione sull'albero generata da i_{com} . Per cui, se v_{sh} è abbastanza grande per forare il film del cuscinetto e distruggere le sue proprietà isolanti, causa una corrente circolante sul cuscinetto i_{bcir} lungo il loop “telaio statore – non drive end – albero – drive end”.

Questo tipo di corrente rispecchia la corrente di modo comune perché è dovuta all'accoppiamento induttivo. A causa della sua natura differenziale, la corrente scorre in direzioni opposte nei due cuscinetti (Fig. 2.10).

Le ampiezze di picco delle correnti circolanti sul cuscinetto variano – a seconda delle dimensioni del motore – $i_{bcir, max} \approx (0.5...20)$ A. Questa corrente è riportata soprattutto in combinazione con grossi motori (tipicamente sopra 100kW) e dipende fortemente dall'ampiezza della corrente i_{com} che aumenta ancora con il crescere della dv/dt .



Corrente di modo comune

Correnti di cuscinetto
(NDE – DE)

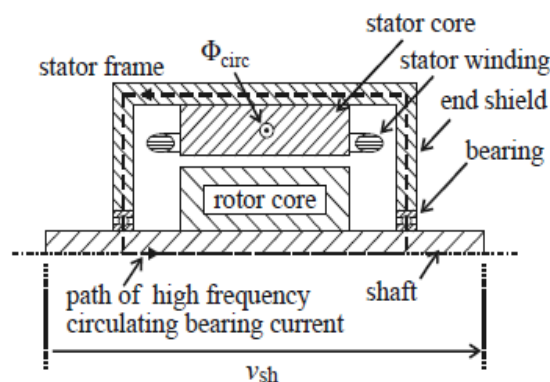


Fig. 2.10: correnti circolanti sul cuscinetto in alta frequenza (caratterizzate dal modo differenziale e ampiezze di diversi A (a seconda delle dimensioni del motore))

(iv) Correnti di terra di rotore

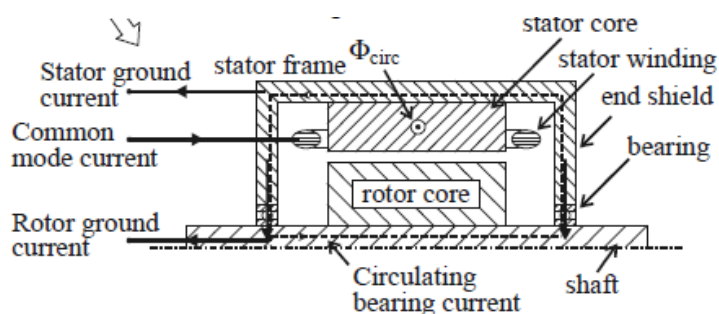
In alcune configurazioni, il rotore può essere connesso al potenziale di terra con un percorso con impedenza significativamente più bassa della messa a terra del telaio di statore; in tali casi, parte della corrente totale di terra generata dall'elevata dv/dt ai terminali del motore può scorrere nei cuscinetti del motore come corrente di terra di rotore i_{rg} e/o – passando l'accoppiamento conduttivo – attraverso il cuscinetto del carico azionato (Fig. 2.11a).

Dal circuito equivalente in alta frequenza delle capacità di macchina (Fig. 2.11b) si osserva che la tensione che si genera ai capi dell'impedenza verso terra del telaio di statore si trova anche tra rotore e frame per cui carica elettricamente il lubrificante; se questa tensione supera la soglia del film isolante $v_{b,th}$ perfora il cuscinetto e vi lascia scorrere parte della corrente di terra.

Le correnti di cuscinetto dovute a questo tipo di correnti possono raggiungere notevoli ampiezze con l'aumento delle dimensioni del motore; quindi sono particolarmente pericolose e possono distruggere i cuscinetti entro un breve periodo di funzionamento (meno di un mese).

a)

Buona connessione a terra del rotore per alte frequenze quando è confrontato con il collegamento di terra del telaio di statore



b)

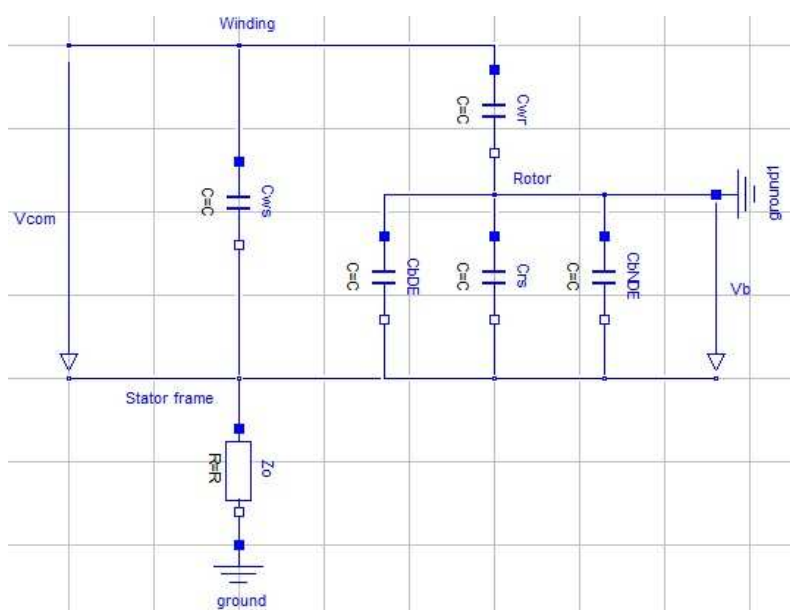


Fig. 2.11: correnti di terra di rotore (caratterizzate dal modo comune e grandi ampiezze, di diversi A (a seconda delle dimensioni del motore): a) percorso della corrente; b) circuito equivalente delle capacità di macchina

2.4.1 Danneggiamento dei cuscinetti attraverso le correnti di cuscinetto

I cuscinetti di una macchina dipendono da diversi parametri, come dimensione del motore, campo di applicazione e condizioni di funzionamento e possono variare in molti aspetti tra macchine differenti. Perciò, i valori assoluti delle correnti di cuscinetto non sono l'appropriata misura per valutare il danneggiamento dei cuscinetti dovuto a queste correnti.

L'area di contatto Hertziana A_H è data dalla deformazione elastica delle sfere o dei rulli del cuscinetto sotto la pressione meccanica in condizioni pratiche di funzionamento. Il calcolo di A_H è un problema complesso; tuttavia, per una data macchina, il suo valore può generalmente essere ottenuto dal fornitore del cuscinetto.

Nel contesto di “classiche” correnti di cuscinetto di grandi macchine dovute alle asimmetrie magnetiche, il danneggiamento dei cuscinetti dovuto alle correnti è considerato attraverso la “densità di corrente apparente del cuscinetto” J_b data dal valore di picco di i_b correlato all'area di contatto Hertziana A_H :

$$J_b = \frac{i_{b,max}}{A_H} \quad (2.4)$$

Nell'ambito di corrente continua (dc) ed applicazioni in bassa frequenza in corrente alternata (ac, 50/60Hz), i limiti della densità di corrente apparente del cuscinetto per valutare il suo danneggiamento sono stati desunti dall'esperienza.

Riassumendo differenti rapporti [1], [2], [3],[4],

- densità di corrente del cuscinetto $J_b \leq 0.1 \text{ A/mm}^2$ non influenzano al vita del cuscinetto e
- densità di corrente del cuscinetto $J_b \geq 0.7 \text{ A/mm}^2$ possono ridurre significativamente la vita del cuscinetto.

Come spiegato in precedenza, le frequenze delle correnti di cuscinetto indotte dall'inverter variano da diversi centinaia di kHz ad alcuni MHz per cui sono molto più alte di 50/60 Hz. Queste correnti, inoltre, possono causare scanalature riducendo la vita o causando guasti del cuscinetto.

La Fig. 2.12 mostra la scanalatura di un anello (guida) del cuscinetto causata da correnti indotte dall'inverter.

Una ricerca di laboratorio proietta la vita del cuscinetto con correnti EDM e dv/dt convertendo i limiti della densità di corrente di cuscinetto “classica” basata sul modello meccanico dell'area di contatto del cuscinetto [5].

Secondo questi autori,

- densità di corrente del cuscinetto $J_b \leq 0.4 \text{ A/mm}^2$ non degradano la vita del cuscinetto,

- densità di corrente del cuscinetto $J_b \leq (0.6...0.8) \text{ A/mm}^2$ probabilmente non degradano la vita del cuscinetto,
- densità $J_b \geq 0.8 \text{ A/mm}^2$ possono mettere in pericolo la vita del cuscinetto significativamente.

Eccetto per questi studi, mancano affermazioni sul meccanismo di danno all'interno del cuscinetto ed un limite per la densità di corrente di cuscinetto pericolosa con alimentazione attraverso inverter.

→ Tuttavia, come regola generale $J_b \leq 0.1 \text{ A/mm}^2$ è suggerita come soglia convenzionale al guasto.

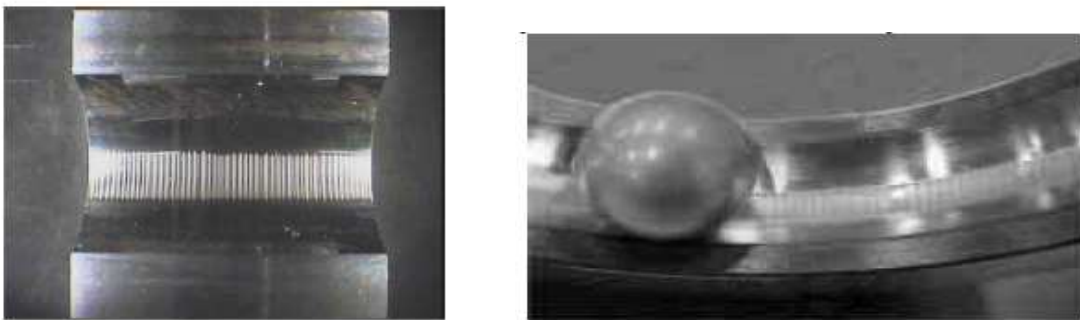


Fig. 2.12: esempi di scanalatura di un anello del cuscinetto causate da correnti indotte dall'inverter

Un'ulteriore ricerca di laboratorio [6] mostra che le densità di corrente del cuscinetto sono elevate per i motori di piccola potenza (nel range di 1kW) e per quelli di potenza elevata (sopra 100kW) per cui questi sono più a rischio di subire danni ai cuscinetti a causa di correnti indotte dall'inverter rispetto ai motori di medie dimensioni tra 10kW e 100kW. Questo perché nel primo caso si ha una piccola area di contatto Hertziana mentre nel caso dei motori più grandi le correnti circolanti aumentano più velocemente con l'aumento delle dimensioni del motore rispetto all'area di contatto A_H .

La densità di corrente apparente del cuscinetto rispetto alla potenza nominale del motore mostra una forma a “vasca da bagno” (Fig. 2.13).

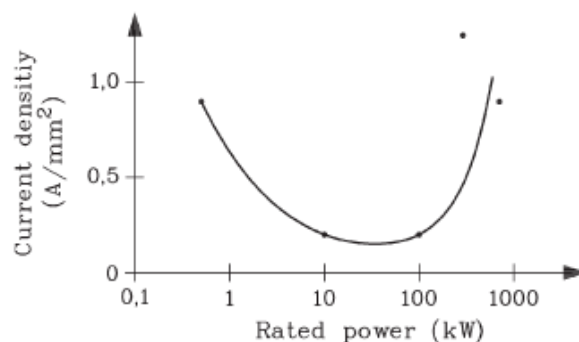


Fig. 2.13: densità di corrente apparente del cuscinetto rispetto alla potenza nominale del motore

3. TECNICHE PER LA MISURA DEI PARAMETRI CORRELATI ALLE CORRENTI DI CUSCINETTO

3.1 Introduzione

Una tecnica di misura affidabile è essenziale per qualsiasi tipo di studio [7].

Per cui, l'impatto delle tecniche di misura sui risultati e la loro interpretazione deve essere tenuto in considerazione quando si studiano i fenomeni di corrente di cuscinetto nei sistemi di azionamento con inverter. Nel contesto di un'analisi di questo tipo possono essere studiati molti parametri differenti. I seguenti parametri permettono una buona conoscenza dei fenomeni che si verificano (Fig. 3.1):

- temperatura di cuscinetto θ_b ;
- corrente di cuscinetto i_b sul drive-end ($i_{b,DE}$) e non drive-end ($i_{b,NDE}$);
- tensione del cuscinetto v_b sul drive-end ($v_{b,DE}$) e non drive-end ($v_{b,NDE}$);
- tensione sull'albero v_{sh} (tensione tra i due cuscinetti lungo l'albero del motore);
- corrente di modo comune i_{com} ;
- corrente di terra di statore i_g (corrente di modo comune che esce dal motore attraverso il telaio di statore);
- corrente di terra di rotore i_{rg} (corrente di modo comune che esce dal motore attraverso l'albero del rotore);
- tensione di modo comune v_{com} .

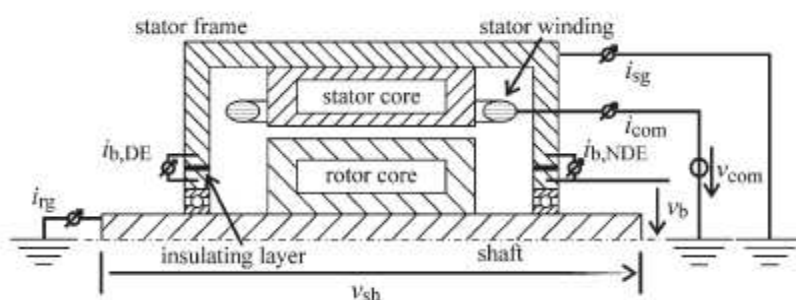


Fig. 3.1: grandezze elettriche misurate

3.2 Preparazione del motore per la valutazione della corrente di cuscinetto

3.2.1 Misura delle correnti di cuscinetto i_b

La corrente di cuscinetto i_b non può essere misurata direttamente all'interno del cuscinetto. Data la sua natura in alta frequenza, dovrebbe essere valutata il più vicino possibile a questo; perciò uno strato di isolamento di un certo spessore deve essere inserito negli scudi dei motori vicini

alla sede del cuscinetto per isolarlo da questi. Piastre isolanti, resistenti alle alte temperature e manicotti permettono di isolare i cuscinetti dalla copertura (dove presente) (Fig. 3.2-3.3).

L'isolamento è poi cortocircuitato da un piccolo "ponte" (anello) di rame che fornisce un percorso per misurare la corrente di cuscinetto con una sonda ad alta frequenza.

Oggi, queste sonde con la necessaria larghezza di banda di diversi MHz ed un range di corrente fino a diversi ampere sono commercialmente disponibili a prezzi ragionevoli.

L'influenza dello strato di isolamento bypassato sulle correnti di cuscinetto misurate non può essere evitato. Tuttavia, se il metodo scelto è lo stesso, l'errore sarà di natura sistematica ed i risultati ottenuti possono essere confrontati tra loro.

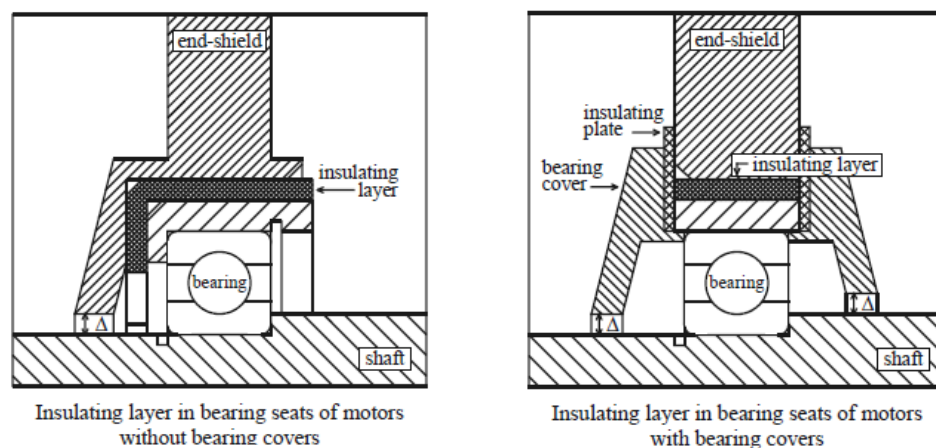


Fig. 3.2: esempi di preparazione delle sedi dei cuscinetti per la misurazione della corrente

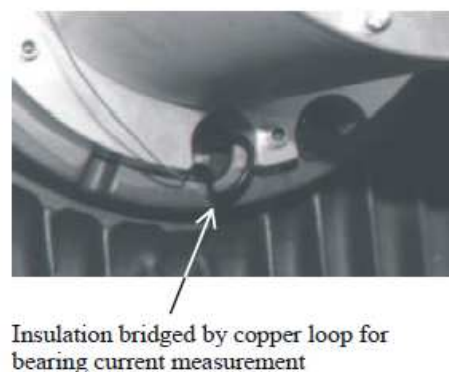


Fig. 3.3: preparazione di un motore ad induzione per la misura delle correnti di cuscinetto indotte dall'inverter

3.2.2 Misura delle tensioni del cuscinetto v_b e dell'albero v_{sh}

A causa della commutazione rapida degli IGBT, l'ambiente di un sistema inverter è soggetto ad un sacco di interferenza elettromagnetica. Perciò, la misura della tensione ai capi del cuscinetto v_b e dell'albero v_{sh} deve essere molto vicina tra loro per evitare l'accoppiamento con altri segnali. Cilindri di alluminio coassiali appositamente costruiti hanno mostrato di essere uno strumento praticabile a tal scopo (Fig. 3.4). Con questi dispositivi, il potenziale elettrico sull'anello esterno

del cuscinetto è reso accessibile all'estremità dell'albero, dove anche il potenziale elettrico dell'albero è misurato. Quest'ultimo viene misurato frontalmente, assialmente all'estremità dell'albero mediante spazzole di carbone e viti a testa piatta che sono assialmente avvitate nel centro dell'albero.

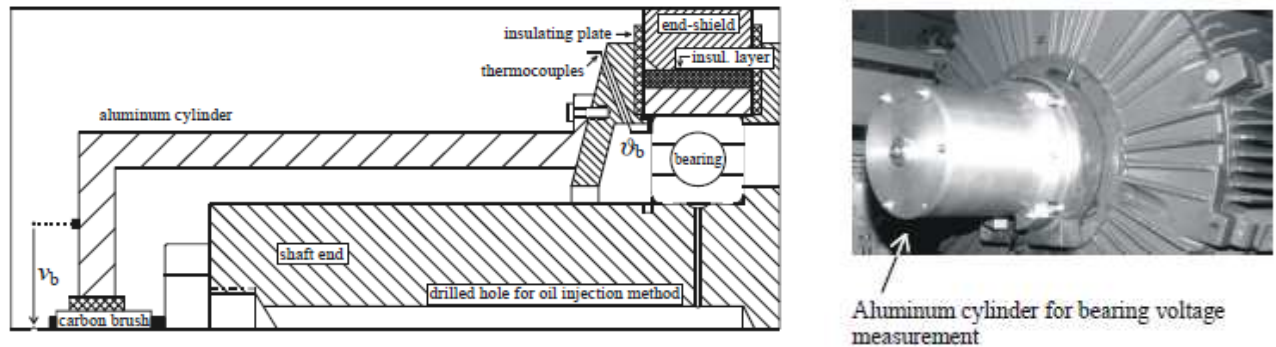


Fig. 3.4: preparazione dell'estremità dell'albero per la misura della tensione del cuscinetto v_b e dell'albero v_{sh} e termocoppie per la misura della temperatura θ_b sull'anello esterno

3.2.3 Misura delle temperature di cuscinetto θ_b

La distribuzione locale di temperatura all'interno del cuscinetto non è accessibile sotto le normali condizioni di funzionamento della macchina con sforzi ragionevoli. Tuttavia, le temperature agli anelli dei cuscinetti possono essere usate come parametri alternativi rappresentativi.

Quando la macchina è funzionante ad una velocità diversa da zero, la temperatura del cuscinetto sull'anello interno del cuscinetto può soltanto essere misurata con costosi contatti striscianti addizionali o trasmissioni senza contatto, ma la temperatura sull'anello esterno θ_b è facilmente accessibile. Infatti, molti azionamenti sono venduti con dispositivi di protezione della temperatura del cuscinetto che misurano la temperatura sull'anello esterno θ_b .

Nei casi in cui un tale dispositivo non faccia già parte dell'azionamento, la temperatura può essere misurata con termocoppie, dopo aver assicurato un buon contatto tra queste e l'anello esterno; per esempio, possono essere o inserite all'interno di un minuscolo foro nell'estremità dello scudo molto vicino al cuscinetto, oppure saldate su piccole piastre di rame che sono pressate contro la pista esterna del cuscinetto (come in Fig. 3.4).

3.2.4 Misura delle correnti di terra

La corrente totale di terra i_{com} , anche chiamata di modo comune, è data dalla somma delle tre correnti di fase ed è la forza motrice delle correnti di cuscinetto indotte dall'inverter di tipo (iii) e (iv). Scorre all'interno della macchina attraverso i conduttori del motore ed esce attraverso i collegamenti di terra.

Può essere misurata come tale utilizzando una bobina di Rogowski che è bloccata intorno ai conduttori del motore. Le bobine che sono usate per questo scopo devono avere la necessaria larghezza di banda di diversi MHz per catturare gli impulsi ripidi di corrente, un range di corrente che sia abbastanza grande per misurare la corrente di modo comune ed un'apertura sufficientemente ampia per accogliere i conduttori del motore. Non sono offerte da un grande numero di produttori ma sono commercialmente disponibili a costi ragionevoli.

Una situazione particolare si verifica se i collegamenti di terra sono noti, cioè ad esempio se il motore è montato su un banco di prova elettricamente isolato e messo a terra attraverso un cavo di terra protettivo. Quindi i_{com} può essere ottenuta anche da queste connessioni e ciò può essere più attuabile se nessuna bobina che soddisfa i suddetti requisiti è disponibile.

$$i_{\text{com}} = i_u + i_v + i_w = i_g + i_{rg} \quad (3.1)$$

N.B. Se il rotore della macchina non è messo a terra, la corrente di terra di statore i_g è uguale alla corrente di modo comune i_{com} !

Anche le correnti di terra di statore e di rotore i_g e i_{rg} possono essere misurate con sonde di corrente ad alta frequenza.

4. MODELLAZIONE DEI SISTEMI DI AZIONAMENTO PER LA DETERMINAZIONE DELLE CORRENTI DI CUSCINETTO

4.1 Calcolo e misura delle capacità parassite e BVR

4.1.1 Capacità tra rotore e telaio C_{rf}

Come visto in precedenza, il rotore ed il telaio di una macchina sono separati solo dal traferro e formano la capacità C_{rf} .

Per il calcolo analitico di questa capacità, lo statore ed il rotore sono considerati come condensatori cilindrici. Il traferro δ è molto più piccolo del diametro esterno del rotore d_{re} . Quindi, il logaritmo naturale del diametro interno della laminazione di statore d_{si} e il diametro esterno della laminazione di rotore d_{re} può essere approssimato secondo la formula sottostante. La linearizzazione in questa formula, conduce ad un errore massimo calcolato inferiore all'1%.

$$\ln\left(\frac{d_{si}}{d_{re}}\right) = \ln\left(\frac{d_{re} + 2\delta}{d_{re}}\right) = \ln\left(1 + \frac{2\delta}{d_{re}}\right) \approx \frac{2\delta}{d_{re}} \quad (4.1)$$

dove: d_{si} = diametro interno della laminazione di statore,

d_{re} = diametro esterno della laminazione di rotore,

δ = traferro (meccanico).

Nei calcoli magnetostatici delle macchine, la riduzione della densità di flusso al traferro dovuta alle aperture di cava è comunemente considerata attraverso il fattore di Carter k_c , che correla un traferro equivalente δ_e ed il traferro meccanico δ e le densità di flusso magnetiche al traferro media e massima B_δ e $B_{\delta,max}$:

$$\begin{aligned} \delta_e &= k_c \delta \\ B_\delta &= \frac{B_{\delta,max}}{k_c} \end{aligned} \quad (4.2)$$

Una situazione analoga è data dall'influenza delle aperture di cava sul campo elettrostatico nel traferro, perché lo stesso tipo di equazioni differenziali si applicano ai campi magnetostatici ed elettrostatici. L'approccio delineato nel seguito considera la riduzione della capacità C_{rf} - quando è confrontata con un condensatore cilindrico senza aperture di cava – dovuta alle aperture di cava.

$$C_{rf} = \frac{Q_{rf}}{V_{rf}} \quad (4.3)$$

$$Q_{rf} = D_{rf} A_{rf} = \epsilon_r \epsilon_0 E_{rf} A_{rf} \quad (4.4)$$

dove: Q_{rf} = carica elettrica sul rotore ed il telaio,

V_{rf} = differenza di tensione tra rotore e telaio,

D_{rf} = densità di flusso elettrico media tra rotore e telaio lungo la circonferenza,

A_{rf} = area tra rotore e telaio con l'ipotesi di cave di rotore chiuse,

E_{rf} = intensità di campo elettrico media tra rotore e telaio attraverso il traferro.

Considerando la linearizzazione si ha: $Q_{rf} = \varepsilon_r \varepsilon_0 \frac{V_{rf}}{\delta} l_{Fe} \pi \cdot d_{re}$ (4.5)

Da cui, usando δ_e e con $\varepsilon_r = 1$ per l'aria $C_{rf} = \varepsilon_0 l_{Fe} \frac{\pi \cdot d_{re}}{k_c \delta}$ (4.6)

Si riportano valutazioni analitiche e misurazioni che sono state eseguite su sei motori ad induzione a gabbia di scoiattolo nell'intervallo di potenza 11kW – 500kW [8]. Le capacità calcolate (per $k_c > 1$ e $k_c = 1$) e quelle misurate (insieme a C_{wr}) sono date in Tab. 4.3.

4.1.2 Capacità tra l'avvolgimento di statore ed il rotore C_{wr}

Il valore di questa capacità è piccolo quando è confrontato con le altre a causa della distanza relativamente grande e della piccola area tra l'avvolgimento di statore ed il rotore. Tuttavia, ha un'influenza importante sul valore del BVR e quindi è la causa fondamentale della tensione di cuscinetto v_b .

C_{wr} è modellata come Q_s condensatori a piastre parallele, ognuno costituito dalla connessione serie della capacità del traferro e dell'altezza dell'apertura di cava con $\varepsilon_r = 1$ (C_{wr0}), e la capacità del cuneo di cava e dell'isolamento di cava superiore con $\varepsilon_r \approx 3$ (C_{wr1}).

$$C_{wr0} = \frac{Q_s \varepsilon_0 b_0 l_{Fe}}{\delta + h_0} \quad (4.7)$$

$$C_{wr1} = \frac{Q_s 3\varepsilon_0 b_0 l_{Fe}}{h_{wedge+ins}} \quad (4.8)$$

$$C_{wr} = \frac{1}{\frac{1}{C_{wr0}} + \frac{1}{C_{wr1}}} \quad (4.9)$$

dove: C_{wr0} = capacità tra avvolgimento di statore e rotore, parte del traferro e apertura di cava,

C_{wr1} = capacità tra avvolgimento di statore e rotore, parte del cuneo e isolamento di cava,

Q_s = numero di cave di statore,

b_0 = larghezza dell'apertura di cava,

δ = traferro (meccanico),

h_0 = altezza dell'apertura di cava,

$h_{\text{wedge+ins}}$ = spessore del cuneo di cava + spessore dell'isolamento.

Le capacità C_{wr} calcolate, insieme alla misura di $C_{\text{rf}} + C_{\text{wr}}$ (come descritto nel Par. 4.1.4) sono riportate in Tab. 4.3.

Si osserva che i valori calcolati della somma $C_{\text{rf}} + C_{\text{wr}}$ sono fino al 30% più piccoli per $k_c > 1$ e fino al 15% per $k_c = 1$. Questo errore si suppone sia dovuto al calcolo di C_{rf} che è calcolato troppo piccolo perché il BVR viene calcolato troppo grande (\rightarrow Par. 4.1.5). Si presume che ciò sia dovuto al contributo dell'anello della gabbia alla capacità che non è stato considerato nei calcoli. Infatti, data la sua complessa struttura, questa capacità non può essere calcolata con un approccio relativamente semplice come è stato fatto per le altre capacità.

4.1.3 Capacità del cuscinetto C_b

Abbiamo detto che se il cuscinetto ruota a velocità sufficiente per far aumentare il film lubrificante elettricamente isolante, che è tipicamente $n > 100/\text{min}$, e non viene applicata nessuna tensione più grande della tensione di soglia al guasto elettrico $v_{b,\text{th}}$, questo agisce come un condensatore. Il calcolo della capacità del cuscinetto è molto difficile perché la struttura geometrica è piuttosto complessa. Quindi si usa un approccio semplificato che utilizza il minimo spessore del film lubrificante h_{lb} e l'area di contatto Hertziana A_H data dalla deformazione elastica delle sfere di un cuscinetto volvente sotto la pressione meccanica in condizioni pratiche di funzionamento.

La capacità di un cuscinetto a sfere è costituita da due capacità in serie: 1) la capacità tra l'anello esterno del cuscinetto e le sfere che sono connesse attraverso la gabbia e 2) la capacità tra le sfere e l'anello interno del cuscinetto (Fig 4.1). La capacità parallelo tra gli anelli esterno ed interno è molto più piccola, a causa della grande distanza che li separa; perciò, è trascurata.

Lo spessore minimo del lubrificante $h_{\text{lb,min}}$ è circa un ordine di grandezza più piccolo del gioco radiale del cuscinetto. Per esempio, è approssimativamente $1 \mu\text{m}$ contro $10 \mu\text{m}$.

Perciò, la capacità è determinata principalmente dalla zona di carico del cuscinetto.

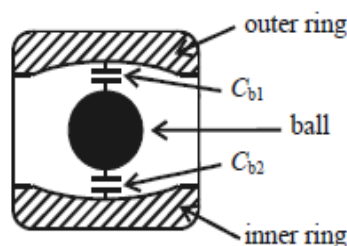


Fig. 4.1: figura schematica delle due capacità di una sfera in un cuscinetto a sfere

Le due capacità C_{b1} e C_{b2} di un cuscinetto si suppone abbiano lo stesso valore. Quindi, la capacità C_b è la metà della capacità tra un anello e le sfere. I valori calcolati sono dati in Tab. 4.4.

$$C_b = 0.5 \frac{\epsilon_r \epsilon_0 A_H}{h_{lb}} \quad (4.10)$$

dove: $\epsilon_r = 3$

A_H = area di contatto Hertziana

$h_{lb,min}$ = spessore minimo del film lubrificante

Non è stata fatta una misura della capacità del cuscinetto, per cui nessun confronto con il calcolo è possibile.

4.1.4 Capacità C_{rf} e C_{wr} misurate e calcolate

Alla fermata, il contatto metallico dei cuscinetti cortocircuita la capacità C_{rf} , che è in parallelo ai cuscinetti. Poiché le sedi dei cuscinetti dei motori sono elettricamente isolate e l'isolamento cortocircuitato con un piccolo filo di rame per misurare le correnti i_b (\rightarrow Par. 3.2.1), è possibile interrompere questo cortocircuito disconnettendo (aprendo) il filo di rame per la misura.

Per cui, le capacità degli strati isolanti degli scudi sui lati DE e NDE, $C_{i,DE}$ e $C_{i,NDE}$, sono in parallelo a C_{rf} . Cortocircuitando C_{wf} , la somma di C_{rf} e C_{wr} può essere derivata dalla misura della capacità C_a (Fig. 4.2).

$$C_{rf} + C_{wr} = C_a - C_{i,NDE} - C_{i,DE} \quad (4.11)$$

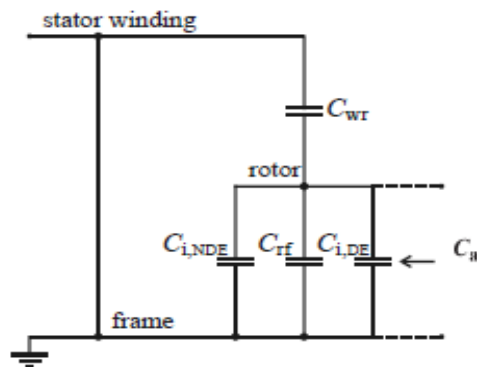


Fig. 4.2: misura della capacità C_a per determinare $C_{rf} + C_{wr}$

E' importante notare che gli *stessi risultati* sono ottenuti *senza cortocircuitare* la capacità tra l'avvolgimento di statore e telaio C_{wf} , perché è alcuni ordini di grandezza più grandi di C_{wr} . Di conseguenza, con misure di questo semplice tipo, le due capacità C_{rf} e C_{wr} non possono essere misurate separatamente.

MOTOR	$C_{rf} + C_{wr}$ measured	C_{rf} calculated $k_c > 1$	C_{rf} calculated $k_c = 1$	C_{wr} calculated
M11a	1.4 nF	0.92 nF	1.15 nF	0.04 nF
M11b	1.7 nF	1.28 nF	1.53 nF	0.15 nF
M110a	2.4 nF	2.14 nF	2.53 nF	0.23 nF
M110b	3.2 nF	2.57 nF	2.81 nF	0.19 nF
M500a	not measured	4.52 nF	4.89 nF	0.22 nF
M500b	not measured	1.29 nF	1.38 nF	0.14 nF

Tab. 4.3: capacità C_{rf} e C_{wr} misurate e calcolate

4.1.5 Rapporto di tensione del cuscinetto BVR

La Tab. 4.4 riassume i valori del BVR calcolati e misurati su motori ad induzione di diversa potenza oltre alle capacità coinvolte [8]. Generalmente, i BVR calcolati sono più grandi di quelli misurati. A causa della differenza della somma $C_{rf} + C_{wr}$ calcolata e misurata, le disuguaglianze tra BVR calcolati e misurati sono probabilmente dovute ad un valore troppo basso della capacità C_{rf} calcolata. Tuttavia, i calcoli forniscono un limite superiore per il valore del BVR e questo è importante per una predizione affidabile del rischio di danni ai cuscinetti dovuto alle correnti di scarica.

Inoltre, i calcoli riflettono il fatto che il motore con il più grande BVR misurato ha anche un valore più elevato del BVR calcolato e l'enfasi che il *BVR è piccolo per tutti i motori*.

MOTOR	C_{rf} calcu- lated $k_c > 1$ pF	C_{rf} calcu- lated $k_c = 1$ pF	C_{wr} calcu- lated pF	BVR ($C_b=0$) calcu- lated $k_c > 1$ %	BVR ($C_b=0$) calcu- lated $k_c = 1$ %	C_b calcu- lated pF	BVR calcu- lated $k_c > 1$ %	BVR calcu- lated $k_c = 1$ %	BVR measured %
M11a	916	1151	38	4.0	3.2	40	3.6	3.0	2.5
M11b	1277	1529	147	10.3	8.7	47	9.7	8.3	7.5
M110a	2137	2527	193	8.3	7.1	60	7.9	6.8	3.5
M110b	2571	2812	225	8.0	7.4	60	6.6	7.1	2.5
M500a	4152	4885	218	4.6	4.3	41	4.9	4.2	not meas.
M500b	1293	1375	137	9.6	9.0	41	9.1	8.6	7.5

Tab. 4.4: capacità del motore e BVR calcolati

Sono identificati i seguenti rapporti significativi delle capacità che contribuiscono al BVR:

$$C_{wr} = \left(\frac{1}{10} \cdots \frac{1}{20} \right) C_{rf} \quad (4.12)$$

$$C_b \approx C_{wr}$$

Riassumendo, l'*influenza di C_b sul BVR è piccola*. Perciò, i BVR dei motori di prova calcolati per $C_b = 0$ (Tab. 4.4) differiscono di poco ($< 10\%$) dai risultati con $C_b > 0$, in particolare per i motori più piccoli.

Il BVR calcolato non supera il 10%. Questo è in linea con l'esperienza di misura che il BVR è generalmente piccolo – $BVR \approx 5-10\%$ – per i motori ad induzione standard a gabbia di scoiattolo. Da questi calcoli possiamo derivare un limite superiore del 10%.

La variazione di C_b con il cambiamento della *velocità del motore* dovuto all'aumento dello spessore del film lubrificante è trascurabile, a causa dei rapporti precedentemente identificati. Finché il film di lubrificazione consente l'accumulo di tensione sul cuscinetto, *il BVR non è notevolmente influenzato dalla velocità del motore*.

Come risultato, finché la velocità del motore è abbastanza elevata per il film lubrificante per avere proprietà elettricamente isolanti e, quindi, far crescere la tensione del cuscinetto, questa parte della catena causa – effetto delle correnti EDM rimane insensibile ad una variazione della velocità del motore. Tuttavia, l'ultimo elemento della catena causa – effetto, che è il verificarsi della corrente di scarica nel cuscinetto, è influenzata dalla variazione della velocità: un cambiamento nella velocità del motore cambia le proprietà del cuscinetto rispetto alla tensione di soglia al guasto elettrico e la probabilità di verificarsi dello stesso, che è innescato da un passaggio di usura metallica all'interno del cuscinetto. Più precisamente, ha luogo un compromesso tra due effetti opposti: lo spessore del film lubrificante aumenta con il crescere della velocità del motore; perciò, la tensione di rottura e, quindi, la corrente di scarica aumenta. Allo stesso tempo, il tempo medio tra passaggi statistici di usura metallica, che cortocircuitano il cuscinetto, diminuisce con l'aumentare della velocità, portando a scariche più frequenti con ampiezze più basse e quindi ad una tensione di cuscinetto e ad un valore medio più piccoli.

La lunghezza del cavo del motore ed il tipo – schermato vs non schermato – non influenzano il BVR perché è un parametro che viene definito solamente attraverso i parametri interni della macchina elettrica. Quindi, la massima tensione di cuscinetto v_b che potrebbe verificarsi *non è influenzata* così come il fenomeno delle correnti di tipo EDM.

La lunghezza ed il tipo di cavo possono comunque influenzare il grado di riflessione della tensione che si verifica ai terminali del motore e far crescere l'ampiezza massima della tensione di modo comune, aumentando perciò l'ampiezza massima della tensione di cuscinetto possibile; se questa supera la tensione di soglia si verifica una corrente di scarica.

I cuscinetti a rulli isolati (“rivestiti”) hanno l'intero anello esterno del cuscinetto ricoperto con uno strato isolante di ossido di alluminio con spessore nell'intervallo 50 – 250 μm . A seconda delle condizioni di funzionamento del motore e delle dimensioni, lo strato isolante è 5 – 250 volte più spesso del minimo spessore del film lubrificante nel cuscinetto che influenza la

capacità secondo la formula di C_b . Tuttavia, l'area che è ricoperta dallo strato isolante è approssimativamente 2000 volte più grande dell'area di contatto Hertziana. Come risultato, la capacità dello strato isolante C_{ins} è circa 10 volte più grande della capacità del cuscinetto C_b . Questa capacità è collegata in serie a quella del cuscinetto. Per cui, la capacità risultante C_b^* ha all'incirca lo stesso valore della capacità C_b dei cuscinetti non isolati.

$$C_b^* = \frac{1}{\frac{1}{C_b} + \frac{1}{C_{ins}}} = \frac{C_b}{1 + \frac{C_b}{C_{ins}}} = \frac{10}{11} C_b \approx C_b \quad (4.13)$$

Con cuscinetti ibridi, il diametro totale delle sfere ceramiche rappresenta la lunghezza del gap isolante tra i due elettrodi della capacità che sono dati dagli anelli di acciaio interni ed esterni del cuscinetto. Quindi la capacità C_b^{**} di un cuscinetto ibrido è ordini di grandezza più piccoli della capacità C_b di un comune cuscinetto. Quindi, il BVR di un motore con cuscinetti ibridi può essere calcolato ponendo $C_b^{**} = 0$.

Riassumendo, il BVR *rimane quasi inalterato con l'uso di cuscinetti isolati o cuscinetti ibridi*.

Comunque, il BVR determina solamente, insieme con la tensione di modo comune, la grandezza della tensione ai capi del cuscinetto ma non la probabilità del verificarsi di un guasto, portando ad un impulso di corrente EDM. Rispetto all'ultimo elemento della catena causa – effetto (Fig. 2.8), cioè il guasto che si verifica all'interno del cuscinetto portando alla corrente di scarica, i cuscinetti isolati e ibridi hanno diverse influenze: con correnti EDM la situazione è differente da una con correnti circolanti sul cuscinetto in alta frequenza. Infatti, il rivestimento elettricamente isolante non influenza direttamente il meccanismo delle correnti EDM all'interno del cuscinetto. Tuttavia, la situazione è molto diversa con cuscinetti ibridi, dove l'intero diametro delle sfere di ceramica rappresenta la lunghezza del gap isolante. Questa distanza è molto più grande dello spessore del film lubrificante, e la rispettiva tensione di guasto è molto più grande della tensione del cuscinetto. Perciò, nessuna corrente di cuscinetto EDM può verificarsi.

OSS. Il BVR non collega solamente le ampiezze ma anche la dv/dt della tensione di modo comune v_{com} e della tensione di cuscinetto v_b :

$$\frac{dv_b}{dt} = \text{BVR} \frac{dv_{com}}{dt} \quad (4.14)$$

La dv/dt di entrambe le tensioni viene determinata secondo lo standard internazionale IEC, dove è definita come il rapporto della differenza di tensione tra il 90% ed il 10% del valore finale della tensione ed il tempo di salita, che è l'intervallo di tempo necessario per l'aumento di tensione.

Il BVR è basso ($BVR < 10\%$) per i motori ad induzione standard a gabbia di scoiattolo. L'influenza della capacità del cuscinetto sul BVR è piccola, perciò, l'influenza del cambiamento della velocità del motore e dell'uso di cuscinetti isolati e ibridi sul BVR è trascurabile.

4.2 Correnti di scarica (EDM)

4.2.1 Modellazione del circuito di misura della corrente di cuscinetto

La corrente di scarica i_b all'interno del cuscinetto non è disponibile per le misure ma solo la corrente i_{bL} nel piccolo filo di rame che cortocircuita l'isolamento. Perciò, il fenomeno è modellato attraverso un semplice circuito al fine di determinare il rapporto tra la corrente di cuscinetto *reale* che si verifica all'interno del cuscinetto i_b e la corrente che viene misurata nel filo di rame i_{bL} .

In questo circuito, la capacità del cuscinetto caricata $C_{b,b}$ si scarica attraverso la resistenza R_b . Questo si traduce in un impulso di corrente con un'ampiezza massima data da:

$$i_{b,max} = \frac{v_{b,b}}{R_b} \quad (4.15)$$

dove $v_{b,b}$ è la tensione di cuscinetto al guasto ed R_b è la resistenza del cuscinetto (Fig. 4.6).

La resistenza del cuscinetto è un parametro sconosciuto e altamente non lineare.

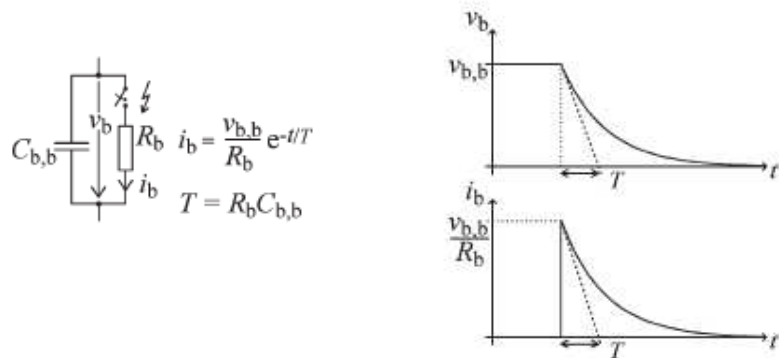


Fig. 4.6: vista semplificata di scarica della capacità del cuscinetto caricata sulla resistenza del cuscinetto

La capacità tra rotore e telaio C_{rf} e la capacità del secondo cuscinetto $C_{b,a}$ sono in parallelo alla capacità del cuscinetto che subisce il guasto; queste due capacità si scaricano sul cuscinetto cortocircuitato. Inoltre, nel circuito equivalente sono aggiunte la capacità dello strato isolante C_i e la resistenza e l'induttanza dell'anello di rame R_{cu} ed L_{cu} applicato per la misura della corrente di cuscinetto (Fig 4.7).

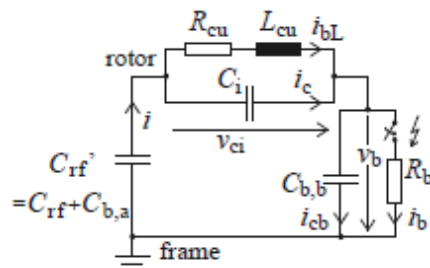


Fig. 4.7: circuito equivalente per rappresentare l'impostazione di misura della corrente EDM

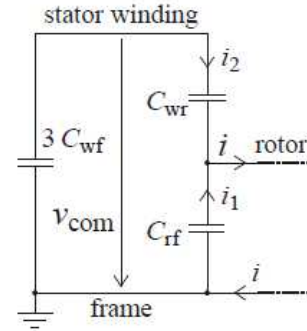
Il possibile contributo di corrente dall'avvolgimento di statore è trascurabile, perché come visto, il rapporto tra la capacità C_{wr} e la capacità tra rotore e telaio C_{rf} è nell'ordine di 0.05...0.1.

Inoltre, i guasti non hanno bisogno necessariamente di verificarsi con un evento di commutazione delle tensioni di statore. Con il tempo di salita della tensione di cuscinetto significativamente più corto del tempo tra due istanti di commutazione (ordine dei ns rispetto a ms), generalmente si verificano quando il tempo di salita della tensione di modo comune è finito, quindi, questa tensione è all'incirca costante al momento del guasto (Fig. 4.8).

$$i = i_1 + i_2 \quad (4.16)$$

$$\begin{aligned} \frac{dv_{com}}{dt} &= -\frac{1}{C_{rf}} i_1 + \frac{1}{C_{wr}} i_2 \\ &= -\left(\frac{1}{C_{rf}} + \frac{1}{C_{wr}}\right) i_1 + \frac{1}{C_{wr}} i \approx 0 \end{aligned} \quad (4.17)$$

$$\Rightarrow i = i_1 \left(\frac{C_{wr}}{C_{rf}} + 1 \right) \approx i_1 \quad (4.18)$$



dove: i = corrente attraverso il rotore,
 i_1 = corrente dal telaio al rotore,
 i_2 = corrente dall'avvolgimento al rotore.

Fig. 4.8: contributo di corrente dall'avvolgimento di statore e telaio del motore alle correnti EDM

4.2.2 Soluzione analitica

La soluzione analitica per le correnti di cuscinetto reale e misurata, i_b e i_{bL} , del circuito equivalente mostrato in Fig 4.7 è data da:

$$i_b = i - i_{bL} \quad (4.19)$$

dove la corrente misurabile nel filo di rame i_{bL} vale [9]:

$$i_{bL} = K_1 e^{\lambda t} + e^{-\alpha} [K_2 \cos(\beta t) + K_3 \sin(\beta t)] \quad (4.20)$$

con K_1, K_2, K_3 costanti.

4.2.3 Risultati dell'influenza del circuito di misura

► **Confronto della corrente misurabile nell'anello di rame i_{bL} e la corrente di cuscinetto "reale" che si verifica all'interno del cuscinetto i_b**

L'influenza del circuito di misura sulle correnti di cuscinetto di scarica elettrica è discussa considerando l'esempio di un motore ad induzione di 11kW [9]. I parametri del circuito equivalente sono riportati qui sotto.

Set di dati

$C_b = C_{b,a} = C_{b,b} = 0.047 \text{ nF}$ (calcolata, Tab 4.4),
 $C_{rf} = 1.529 \text{ nF}$ (calcolata, Tab.4.4),
 $C_i = 1.5 \text{ nF}$ (misurata),
 $L_{cu} = 0.1 \text{ } \mu\text{H}$ (misurata),
 $R_{cu, \text{MHz}} = 0.2 \text{ } \Omega$ (stimata dal valore misurato $R_{cu, \text{dc}} = 0.02 \text{ } \Omega$),
 $R_b = 10 \text{ } \Omega$ (stimata),
 $v_{b,b} = 15 \text{ V}$ (misurata).

Con questo set di dati, l'ampiezza di picco calcolata della corrente misurabile i_{bL} è $i_{bL, \text{max}} = 0.95 \text{ A}$. Con il modello semplice di Fig. 4.6, la corrente di picco $i_{b, \text{max}}$ si verifica al tempo $t = 0$ ed è $i_{b, \text{max}} = v_{b,b} / R_b = 15 \text{ V} / 10 \text{ } \Omega = 1.5 \text{ A}$.

Con il modello esteso (Fig. 4.7), la stessa corrente di cuscinetto di picco $i_{b, \text{max}} = 1.5 \text{ A}$ viene determinata ma decresce con alcune oscillazioni dovute all'induttanza del loop.

L'ampiezza della corrente misurabile calcolata $i_{bL, \text{max}}$ è circa 2/3 della corrente di cuscinetto "reale" non misurabile $i_{b, \text{max}}$. La corrente misurabile nell'anello di rame i_{bL} dunque permette solo una stima approssimata della "reale" corrente all'interno del cuscinetto i_b , che può essere descritta dal rapporto $i_{bL, \text{max}} / i_{b, \text{max}}$.

Con i dati ordini di grandezza, il valore della resistenza R_{cu} del filo di rame ha solo una piccola influenza sull'ampiezza della corrente misurata. Il valore dell'induttanza L_{cu} è più importante, poiché un aumento di un fattore di 10 comporta una riduzione della corrente misurabile di circa il 50%. Tuttavia, una diminuzione di L_{cu} di un fattore di 10 non si traduce in un significativo miglioramento del rapporto i_{bL} / i_b verso 1 (Tab. 4.9).

Lo stesso vale per il valore di capacità dello strato isolante C_i ; un aumento di C_i di un fattore di 10 riduce l'ampiezza della corrente misurabile di quasi il 50%, mentre il cambiamento dell'ampiezza della corrente misurabile è irrilevante se il valore di C_i è diminuito di 10 volte (Tab. 4.9).

$L_{cu} = 0.01 \text{ } \mu\text{H}$	$R_{cu} = 0.02 \text{ } \Omega$	$i_{bL}/i_b = 1.80 \text{ A}/1.5 \text{ A} = 1.20$
	$R_{cu} = 0.20 \text{ } \Omega$	$i_{bL}/i_b = 1.69 \text{ A}/1.5 \text{ A} = 1.13$
	$R_{cu} = 2.00 \text{ } \Omega$	$i_{bL}/i_b = 1.04 \text{ A}/1.5 \text{ A} = 0.69$
$L_{cu} = 0.10 \text{ } \mu\text{H}$	$R_{cu} = 0.02 \text{ } \Omega$	$i_{bL}/i_b = 0.97 \text{ A}/1.5 \text{ A} = 0.65$
	$R_{cu} = 0.20 \text{ } \Omega$	$i_{bL}/i_b = 0.96 \text{ A}/1.5 \text{ A} = 0.64$
	$R_{cu} = 2.00 \text{ } \Omega$	$i_{bL}/i_b = 0.79 \text{ A}/1.5 \text{ A} = 0.53$
$L_{cu} = 1.00 \text{ } \mu\text{H}$	$R_{cu} = 0.02 \text{ } \Omega$	$i_{bL}/i_b = 0.38 \text{ A}/1.5 \text{ A} = 0.25$
	$R_{cu} = 0.20 \text{ } \Omega$	$i_{bL}/i_b = 0.38 \text{ A}/1.5 \text{ A} = 0.25$
	$R_{cu} = 2.00 \text{ } \Omega$	$i_{bL}/i_b = 0.35 \text{ A}/1.5 \text{ A} = 0.23$
$C_i = 0.15 \text{ nF}$		$i_{bL}/i_b = 0.96 \text{ A}/1.5 \text{ A} = 0.64$
$C_i = 1.5 \text{ nF}$		$i_{bL}/i_b = 0.96 \text{ A}/1.5 \text{ A} = 0.64$
$C_i = 15 \text{ nF}$		$i_{bL}/i_b = 0.53 \text{ A}/1.5 \text{ A} = 0.35$

Tab. 4.9: influenza della resistenza e dell'induttanza del filo di rame e della capacità dello strato isolante per la misura della corrente di cuscinetto sul rapporto $i_{bL, \text{max}} / i_{b, \text{max}}$ motore da 11kW

► **Discussione dell'influenza dei parametri del circuito elettrico equivalente R_b , v_b , C_b , e C_{rf}**

La resistenza del cuscinetto R_b chiaramente ha un'*influenza importante* sulle correnti di cuscinetto “reale” e misurata; con il suo aumento infatti entrambi i picchi di ampiezza $i_{b,\max}$ ed $i_{bL,\max}$ diminuiscono. L'ampiezza $i_{b,\max}$ è inversamente proporzionale ad R_b .

Il suo valore di solito è dato nell'intervallo (5...20) Ω , così che si conclude un tipico rapporto $i_{bL,\max} / i_{b,\max} = 2/3$ (Tab. 4.10).

$R_b = 1 \Omega$	$i_{bL}/i_b = 1.27 \text{ A}/15 \text{ A} = 0.09$
$R_b = 10 \Omega$	$i_{bL}/i_b = 0.96 \text{ A}/1.5 \text{ A} = 0.64$
$R_b = 100 \Omega$	$i_{bL}/i_b = 0.24 \text{ A}/0.15 \text{ A} = 1.60$

Tab. 4.10: influenza calcolata della resistenza del cuscinetto sul rapporto $i_{bL,\max} / i_{b,\max}$ del motore di 11kW

Poiché i parametri assunti sono costanti, il sistema è lineare. Quindi, entrambe le ampiezze $i_{b,\max}$ ed $i_{bL,\max}$ *aumentano linearmente* con il valore della tensione del cuscinetto al guasto $v_{b,b}$.

Con la capacità del cuscinetto C_b aumentata di tre decenni da 0.0047 nF a 4.7 nF e gli altri parametri secondo il set di dati, il rapporto tra le ampiezze massime delle correnti $i_{bL,\max} / i_{b,\max}$ aumenta solamente da 0.63 a 0.78 (Tab. 4.11). Per cui, *l'influenza di C_b è molto piccola*.

La situazione è molto diversa per il valore della capacità tra rotore e telaio C_{rf} dove la forma d'onda della corrente di cuscinetto “reale” i_b cambia notevolmente come varia il valore di questa capacità.

Lo stesso vale per la forma d'onda di i_{bL} : poiché l'energia immagazzinata nella capacità C_{rf} si scarica attraverso il cuscinetto che subisce il guasto, perciò passando attraverso il filo di rame, la corrente misurabile i_{bL} è *fortemente influenzata* da C_{rf} . Con il valore di C_{rf} aumentato di tre decenni da 0.153 nF a 152.9 nF e gli altri parametri sempre secondo il set di dati, il rapporto $i_{bL,\max} / i_{b,\max}$ aumenta di quasi una decade da 0.15 a 1.21! (Tab. 4.11).

$C_b = 0.0047 \text{ nF}$	$C_{rf} = 1.529 \text{ nF}$	$i_{bL}/i_b = 0.95 \text{ A}/1.5 \text{ A} = 0.63$
$C_b = 0.047 \text{ nF}$		$i_{bL}/i_b = 0.96 \text{ A}/1.5 \text{ A} = 0.64$
$C_b = 0.47 \text{ nF}$		$i_{bL}/i_b = 1.01 \text{ A}/1.5 \text{ A} = 0.67$
$C_b = 4.7 \text{ nF}$		$i_{bL}/i_b = 1.17 \text{ A}/1.5 \text{ A} = 0.78$
$C_b = 0.047 \text{ nF}$	$C_{rf} = 0.153 \text{ nF}$	$i_{bL}/i_b = 0.22 \text{ A}/1.5 \text{ A} = 0.15$
	$C_{rf} = 1.529 \text{ nF}$	$i_{bL}/i_b = 0.96 \text{ A}/1.5 \text{ A} = 0.64$
	$C_{rf} = 15.29 \text{ nF}$	$i_{bL}/i_b = 1.76 \text{ A}/1.5 \text{ A} = 1.17$
	$C_{rf} = 152.9 \text{ nF}$	$i_{bL}/i_b = 1.81 \text{ A}/1.5 \text{ A} = 1.21$

Tab. 4.11: influenza della capacità del cuscinetto C_b e della capacità C_{rf} sul rapporto $i_{bL,\max} / i_{b,\max}$

Il percorso della corrente EDM e l'anello di rame che bypassa l'isolamento della sede del cuscinetto applicato per lo scopo di misura, è descritto attraverso un circuito elettrico equivalente.

Poiché le correnti di cuscinetto possono essere misurate solo indirettamente, è possibile solo una stima approssimata della corrente reale all'interno del cuscinetto.

Il rapporto tipico dell'ampiezza di picco della corrente misurabile nell'anello di rame $i_{bL,max}$, che è stata presa come corrente di cuscinetto, contro l'ampiezza di picco della corrente di cuscinetto reale $i_{b,max}$ è circa 2/3.

4.3 Correnti circolanti sul cuscinetto

4.3.1 Calcolo del flusso di anello di modo comune

La corrente di modo comune i_{com} che eccita il flusso magnetico circonferenziale entra nella macchina dagli avvolgimenti di statore ed esce attraverso il collegamento (i) di terra del motore, perciò passando attraverso il pacco di laminazione di statore. La conoscenza della generazione del flusso di modo comune Φ_0 (o Φ_{circ}) è essenziale per la comprensione del fenomeno della corrente circolante.

La distribuzione di corrente nella laminazione di statore può essere descritta attraverso un modello alle correnti parassite con una variazione sinusoidale dei parametri rispetto al tempo [10].

I denti di statore e le estremità degli avvolgimenti sono esclusi dal modello, poiché si suppone che il flusso circonferenziale fluisca principalmente nella parte cilindrica della laminazione di statore, il cosiddetto giogo di ferro; inoltre la densità della distribuzione di corrente, poiché questa entra nella laminazione di statore dall'avvolgimento, si assume essere costante lungo la lunghezza del pacco.

La laminazione stessa è descritta attraverso la sovrapposizione di un modello analitico per:

1) un semipiano conduttivo e 2) due semipiani conduttivi, perché lo spessore di penetrazione δ_s alle frequenze della corrente i_{com} (di diversi 100kHz) è molto più piccolo dello spessore del foglio di laminazione. Il modello analitico 1), per un semipiano conduttivo, è utilizzato se la corrente entra dalle cave di statore ed esce attraverso il telaio. Il modello analitico 2), con due semipiani, è applicato se la corrente entra nella lamina da un lato dello statore ed esce dall'altro.

La soluzione di campo in un lamina, con la corrente che scorre sia dall'avvolgimento che dalla lamina contigua è data dalla sovrapposizione dei due modelli [10] (Fig. 4.12 – 4.13).

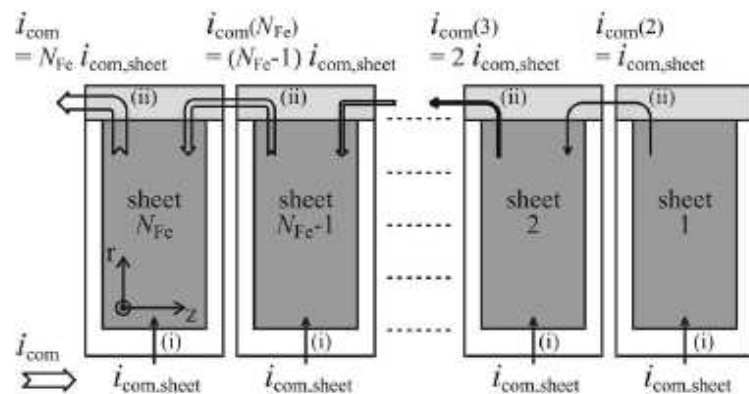


Fig. 4.12: correnti di modo comune delle singole lamine che scorrono dall'avvolgimento di statore [caso (i)] e dalla lamina contigua [caso (ii)]

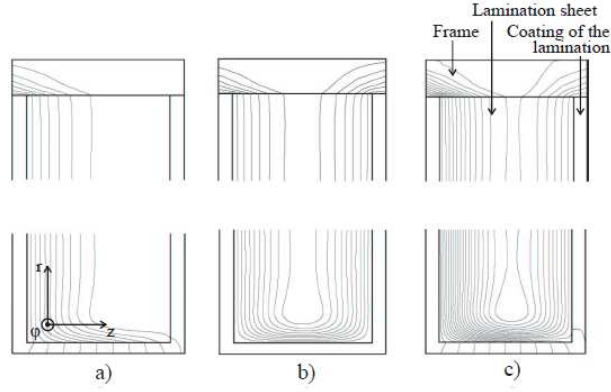


Fig. 4.13: soluzione di campo in una singola lamina: a) corrente che scorre dall'avvolgimento
b) corrente che scorre dalla lamina contigua; c) corrente totale

La soluzione analitica del flusso di modo comune totale è data da:

$$\phi_0 = \mu \frac{N_{Fe} i_{com}}{2\pi} \ln \left(\frac{d_{si}/2}{d_{si}/2 + h_s} \right) \quad (4.21)$$

dove: N_{Fe} è il numero di lamine del pacco del nucleo di statore ($\gg 1$),

d_{si}/d_{se} = diametro interno/esterno della laminazione di statore,

h_s = altezza della cava di statore.

Oss. Il numero di lamine del pacco del nucleo di statore N_{Fe} è proporzionale alla lunghezza del nucleo di statore l_{Fe} che è proporzionale all'altezza dell'albero di una macchina H . Inoltre, la capacità C_{wf} è proporzionale al quadrato di H e la corrente di modo comune è circa proporzionale a C_{wf} .

Quindi il flusso di modo comune Φ_0 aumenta con il cubo delle dimensioni del motore (altezza dell'albero), perciò le correnti circolanti dominano nel caso di grandi motori.

4.3.2 Impedenze del percorso e circuito equivalente per il calcolo della corrente di cuscinetto

Utilizzando questo modello alle correnti parassite come un punto di partenza, è stato sviluppato un circuito equivalente per la corrente circolante sul cuscinetto in alta frequenza.

Questo modello utilizza la corrente di modo comune come un parametro d'ingresso (sorgente), perciò assumendo che la forma d'onda della corrente, inclusa la sua ampiezza e la frequenza dominante, sono note. Quindi, la forma d'onda della corrente di modo comune è considerata come data ed i diversi fattori che influenzano il suo valore, come la dv/dt della tensione di modo comune, non sono inclusi nel modello.

Al tal scopo, sono considerate la mutua induttanza L_g che crea un accoppiamento tra la corrente di terra (di modo comune) e quella circolante sul cuscinetto, l'induttanza totale L_b e la resistenza R_b lungo il percorso della corrente di cuscinetto.

Sono distinte quattro diverse parti del percorso della corrente circolante sul cuscinetto (Fig. 4.14):

- 1) il percorso attraverso il pacco di laminazione di statore (resistenza $R_{b,Fe}$ ed induttanza interna $L_{b,Fe}$);
- 2) l'area racchiusa dalla corrente circolante sul cuscinetto che è data dal traferro e la cavità dell'estremità dell'avvolgimento (auto – induttanza $L_{b,air}$);
- 3) percorso al di fuori della laminazione di statore (resistenza $R_{b,i}$ ed induttanza interna $L_{b,i}$), tranne per il cuscinetto;
- 4) cuscinetto (resistenza R_b).

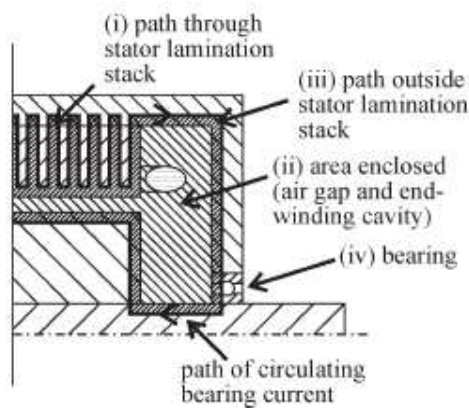


Fig. 4.14: parti del percorso della corrente circolante sul cuscinetto per lo sviluppo del circuito equivalente; per chiarezza, è rappresentata solo metà macchina

Una tensione dell'albero di circa 1 V è già abbastanza grande per causare un guasto del film lubrificante elettricamente isolante; quindi, se la corrente di cuscinetto scorre, questo deve essere modellato come una resistenza invece di una capacità. Avendo le correnti circolanti sul cuscinetto picchi di diversi A, la resistenza del cuscinetto R_b si assume che abbia un valore minore di 10 mΩ. Quindi è *trascurabile*.

Si può dimostrare che l'induttanza interna $L_{b,i}$ e la resistenza $R_{b,i}$ del percorso della corrente di cuscinetto al di fuori della laminazione di statore *possono essere trascurate*, dati i loro bassi valori, quando si confrontano con le prime due parti del percorso della corrente di cuscinetto individuato.

Perciò, il circuito equivalente risultante per la corrente circolante sul cuscinetto in alta frequenza è dato da:

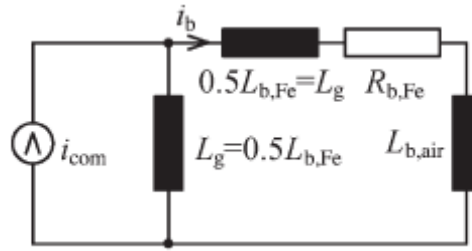


Fig. 4.15: circuito equivalente per il calcolo delle correnti circolanti sul cuscinetto in alta frequenza

Per una data frequenza $f = \omega / 2\pi$, L_g è ricavata da

$$V_{\max} = j\omega\phi_0 = [R_g + j\omega L_g] \cdot I_{\text{com,max}} \quad (4.22)$$

dove: V ed I_{com} sono la tensione e la corrente di modo comune in una notazione complessa.

Come derivato in [10] la mutua induttanza L_g , le induttanze $L_{b,Fe}$ ed $L_{b,air}$ e la resistenza $R_{b,Fe}$ sono ottenute da:

$$L_g = \frac{N_{Fe}}{2} \frac{\mu}{\pi} \ln \left(\frac{d_{se}/2}{d_{si}/2 + h_s} \right) \frac{\delta_s}{2} \quad (4.23)$$

$$L_{b,Fe} = \mu \frac{N_{Fe}}{\pi} \ln \left(\frac{d_{se}/2}{d_{si}/2 + h_s} \right) \frac{\delta_s}{2} \quad (4.24)$$

$$L_{b,air} = L_{b,air,gap} + L_{b,air,ew} = \frac{\mu_0}{2\pi} \left\{ \ln \left(\frac{d_{si}}{d_{re}} \right) l_{Fe} + \left(\frac{d_{se}}{d_{ri}} \right) (l_b - l_{Fe}) \right\} \quad (4.25)$$

$$R_{b,Fe} = N_{Fe} \frac{\omega\mu}{\pi} \ln \left(\frac{d_{se}/2}{d_{si}/2 + h_s} \right) \frac{\delta_s}{2} = \omega L_{b,Fe} \quad (4.26)$$

dove: N_{fe} è il numero di lamine del pacco del nucleo di statore,

d_{re} / d_{ri} = diametro esterno/interno della laminazione di rotore,

d_{si} / d_{se} = diametro interno/esterno della laminazione di statore,

h_s = altezza della cava di statore,

l_b = distanza tra le sedi dei cuscinetti.

4.3.3 Rapporto della corrente circolante sul cuscinetto e corrente di terra

Per una data frequenza ω , il rapporto di trasformazione $|i_{b,\max} / i_{\text{com},\max}|$ è ottenuto dal rapporto delle rispettive impedenze (Fig. 4.15):

$$\left| \frac{i_{b,\max}}{i_{\text{com},\max}} \right| = \left| \frac{j\omega L_g}{R_{b,\text{Fe}} + j\omega L_{b,\text{Fe}} + j\omega L_{b,\text{air}}} \right| \quad (4.27)$$

► Per vedere l'influenza del filo di rame che è applicato per la misura della corrente di cuscinetto il circuito equivalente è esteso, includendo gli strati isolanti cortocircuitati (Fig. 4.16). Il valore dell'induttanza del rame è $L_{\text{cu}} = 0.1 \mu\text{H}$ mentre la capacità dello strato isolante C_i è nell'ordine di $(1 \dots 5) \text{ nF}$. Poiché l'intervallo di frequenza delle correnti circolanti sul cuscinetto è di diversi centinaia di kHz, l'impedenza capacitiva parallela $X_i = 1/(\omega C_i)$ data dallo strato isolante è molto più grande dell'impedenza induttiva dell'anello di rame $X_{\text{cu}} = \omega L_{\text{cu}}$. Perciò è *trascurata*. In modo simile, a queste frequenze, la resistenza R_{cu} che è in serie all'induttanza è *irrilevante*.

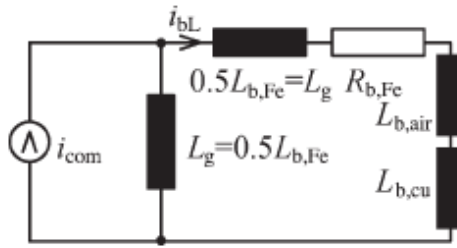


Fig. 4.16: circuito equivalente per il calcolo della corrente circolante sul cuscinetto, comprendente gli strati isolanti cortocircuitati

Similmente a prima, il rapporto di trasformazione $|i_{bL,\max} / i_{\text{com},\max}|$, dove $i_{bL,\max}$ è l'ampiezza della corrente di cuscinetto considerando il filo di rame, è dato da:

$$\left| \frac{i_{bL,\max}}{i_{\text{com},\max}} \right| = \left| \frac{j\omega L_g}{R_{b,\text{Fe}} + j\omega L_{b,\text{Fe}} + j\omega L_{b,\text{air}} + 2j\omega L_{b,\text{cu}}} \right| \quad (4.28)$$

Questi due rapporti sono stati calcolati per alcuni motori ad induzione a gabbia di scoiattolo in un certo intervallo di potenza [9]. A seconda dei valori di f e della permeabilità relativa μ_r , l'anello di rame per la misura delle correnti di cuscinetto riduce le correnti circolanti a livelli di potenza elevata (sopra 100kW) da circa il 10% al 40%.

Per i motori di piccola potenza, questi calcoli non sono di importanza, poiché nessun flusso di corrente circolante sul cuscinetto si verifica.

4.3.4 Influenza dei cuscinetti isolati e sedi interne dei cuscinetti isolate

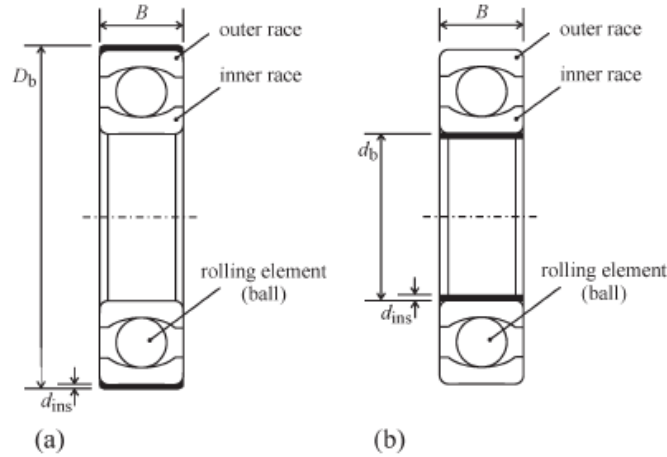


Fig. 4.17: parametri per il calcolo della capacità data da: a) rivestimento isolante del cuscinetto rivestito o b) sede del cuscinetto rivestita

► I cuscinetti isolati (“rivestiti”) sono cuscinetti convenzionali che hanno un rivestimento isolante addizionale di spessore tipicamente (50...250) μm sull’anello esterno del cuscinetto. Alternativamente, un rivestimento isolante – ad esempio, di spessore 500 μm – può essere applicato all’albero del motore dove è posto il foro del cuscinetto (Fig. 4.17).

La capacità data dal rivestimento isolante del cuscinetto ($C_{\text{ins}}^{(1)}$) o dall’albero rivestito ($C_{\text{ins}}^{(2)}$) è calcolata come la capacità di un condensatore cilindrico.

Le formule sono date dalle espressioni sottostanti.

$$C_{\text{ins}}^{(1)} = \frac{\epsilon_r \epsilon_0 B D_b \pi}{d_{\text{ins}}} \quad (4.29)$$

$$C_{\text{ins}}^{(2)} = \frac{\epsilon_r \epsilon_0 B d_b \pi}{d_{\text{ins}}} \quad (4.30)$$

dove: $\epsilon_r = 3$,

B = larghezza del cuscinetto,

D_b = diametro esterno del cuscinetto,

d_{ins} = spessore dello strato isolante,

d_b = diametro interno del foro.

I valori delle capacità $C_{\text{ins}}^{(1)}$ e $C_{\text{ins}}^{(2)}$ sono stati calcolati per tre tipi di cuscinetto isolati, 6209, 6316 e 6317 (Tab. 4.18) e cinque diversi tipi di fori del cuscinetto (Tab. 4.19).

TYPE OF BEARING	BEARING OUTER DIAMETER D_b	WIDTH B	$C_{ins}^{(1)}$ $d_{ins} = 50 \mu m$	$C_{ins}^{(1)}$ $d_{ins} = 100 \mu m$	$C_{ins}^{(1)}$ $d_{ins} = 250 \mu m$
6209	85 mm	19 mm	2.70 nF	1.35 nF	0.54 nF
6316	170 mm	39 mm	11.07 nF	5.53 nF	2.21 nF
6317	180 mm	41 mm	12.32 nF	6.16 nF	2.46 nF

Tab. 4.18: capacità dei cuscinetti isolati calcolate per i diversi spessori dell'isolamento

MOTOR SIZE (SHAFT HEIGHT)	BEARING BORE d_b	WIDTH B	$C_{ins}^{(2)}$ $d_{ins} = 500 \mu m$
160 mm	45 mm	19 mm	45 pF
280 mm	80 mm	39 mm	166 pF
280 mm	85 mm	39 mm	176 pF
400 mm	85 mm	41 mm	185 pF
400 mm	120 mm	40 mm	254 pF

Tab. 4.19: capacità dell'albero del motore rivestito calcolate

I valori di $C_{ins}^{(1)}$ sono calcolati per i tre valori di d_{ins} che sono tipici per i cuscinetti isolati commercialmente disponibili, $d_{ins} = 50, 100$ e $250 \mu m$. A seconda del diametro esterno del cuscinetto, il suo valore varia approssimativamente tra 0.5 nF e 2 nF per il cuscinetto piccolo 6209, e tra, circa, 2 nF e 12 nF per i cuscinetti più grandi 6316 e 6317. I risultati mostrano anche l'influenza della proporzionalità inversa di d_{ins} e l'influenza lineare di D_b e B .

I valori di $C_{ins}^{(2)}$ sono calcolati per $d_{ins} = 500 \mu m$. A seconda delle dimensioni del cuscinetto, il suo valore varia tra 45 pF per il foro piccolo del cuscinetto di 45 mm fino a 254 pF per il foro più grande. In modo simile a $C_{ins}^{(1)}$, è visibile dai risultati l'influenza lineare di d_b e B .

In generale, i valori di $C_{ins}^{(2)}$ sono un ordine di grandezza più piccoli dei valori di $C_{ins}^{(1)}$.

► Il circuito equivalente della corrente circolante sul cuscinetto con l'uso di due cuscinetti convenzionali (Fig. 4.15) è esteso attraverso una capacità addizionale C_{ins} all'interno del percorso della corrente i_b (Fig. 4.20); questa capacità tiene conto dell'uso di uno o due cuscinetti isolati oppure delle sedi di cuscinetto isolate.

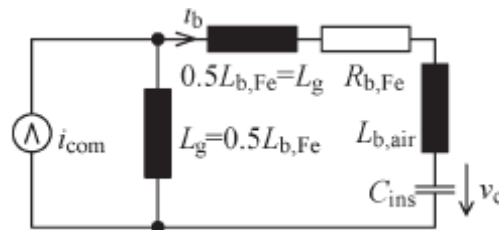


Fig. 4.20: circuito equivalente per il calcolo della corrente di cuscinetto circolante in alta frequenza con l'uso di cuscinetti isolati o sedi del cuscinetto isolate elettricamente

Basandosi su questo circuito equivalente, la correlazione tra la corrente di modo comune i_{com} e la corrente circolante sul cuscinetto in alta frequenza indotta i_b è descritta da [10]:

$$i_b = \frac{C}{D} \left\{ \frac{\alpha}{\beta} \sin(\gamma) - \frac{\omega}{\beta} \cos(\gamma) - \frac{D}{\omega\beta} \right\} e^{-\alpha} \sin(\beta t) + \sin(\gamma) e^{\alpha} \cos(\beta t) + \sin(\omega t - \gamma) \quad (4.31)$$

con i parametri ω , γ , C , D dati.

La riduzione della corrente di cuscinetto, con l'uso di uno strato isolante all'interno del suo percorso, è calcolata basandosi sui circuiti equivalenti di Fig. 4.15 e 4.20.

Per chiarezza, l'ampiezza massima della corrente di cuscinetto con l'uso di uno strato isolante è indicata come $i_{b,max}^*$. Questa ampiezza si verifica al tempo t^* , dato da

$$i_{b,max}^* = i_b(t^*) \quad (4.32)$$

$$t^* = \frac{1}{\omega} \arctan\left(\frac{\omega}{\alpha}\right) \quad (4.33)$$

L'ampiezza massima della corrente di cuscinetto, senza l'uso di uno strato isolante nel percorso della corrente, è denominata $i_{b,max}$. La riduzione di corrente ottenuta dall'isolamento addizionale è poi calcolata come rapporto di $i_{b,max}^*$ ed $i_{b,max}$.

► Al fine di verificare la modellazione, la riduzione della corrente di cuscinetto calcolata è confrontata con i risultati di misura [10]. La riduzione della corrente di cuscinetto, con l'uso di uno e due cuscinetti isolati con spessore dell'isolamento $d_{ins} = 250 \mu m$, è stata misurata su due motori ad induzione a gabbia di scoiattolo con potenza di 110kW e 500kW.

Le riduzioni di corrente analiticamente previste e misurate sono mostrate in Tab. 4.21.

La riduzione prevista fino al 25%,...,38%, a seconda della dimensione del motore e del numero di cuscinetti isolati, si adatta bene con la riduzione misurata fino al 20%,...,40%.

Quindi le previsioni teoriche della riduzione di corrente di cuscinetto sono in linea con la riduzione di corrente realmente misurata.

Motor	Bearing current reduction $i_{b,max}^*/i_{b,max}$			
	Calculated	Measured	Calculated	Measured
	1 insul. bearing, $d_{ins}=250\mu m$		2 insul. bearing, $d_{ins}=250\mu m$	
M110b	0.37	0.40	0.26	0.20
M500b	0.38	0.30	0.25	0.21

Tab. 4.21: riduzione della corrente di cuscinetto calcolata con l'uso di uno o due cuscinetti isolati

► E' stata calcolata anche la riduzione della corrente circolante sul cuscinetto ottenuta attraverso l'uso di uno o due cuscinetti isolati o sedi rivestite con diversi spessore dello strato isolante.

La riduzione della corrente di cuscinetto $i_{b,max}^* / i_{b,max}$ che deriva dallo strato isolante aggiuntivo di diversi spessori è mostrato in Tab. 4.22. I valori dei parametri circuitali diversi da C_{ins} rimangono invariati.

I risultati mostrano la grande influenza dello spessore dello strato di isolamento sulla riduzione della corrente di cuscinetto ottenuta. Questo è vero nello stesso modo per entrambi i motori.

La riduzione di corrente più significativa si ottiene con una sede del cuscinetto isolata con uno spessore del rivestimento isolante di 500 μm . Quando si confronta l'uso di uno o due cuscinetti isolati, l'aumento della riduzione di corrente ottenuta attraverso un secondo cuscinetto isolato può essere ottenuta anche con un appropriato aumento degli spessori dello strato isolante.

Riassumendo, per motori di queste dimensioni, lo spessore del rivestimento isolante deve essere almeno $d_{ins} = 250 \mu m$ per ridurre la corrente circolante fino a meno del 30% del suo valore iniziale.

Questo spessore conduce a densità di corrente apparenti del cuscinetto $J_b \leq 0.1 A/mm^2$, che è comunemente considerata come la soglia convenzionale al guasto e quindi non dannosa per il cuscinetto.

Motor	Bearing current reduction $i_{b,max}^* / i_{b,max}$				
	$C_{ins,1}$	$C_{ins,1}$	$C_{ins,1}$	$C_{ins,2}$	$0.5C_{ins,1}$
	$d_{ins}=50\mu m$ 1 insulated bearing	$d_{ins}=100\mu m$ 1 insulated bearing	$d_{ins}=250\mu m$ 1 insulated bearing	$d_{ins}=500\mu m$ 1 insulated bearing seat	$d_{ins}=250\mu m$ 2 insulated bearings
M110b	0.41	0.30	0.20	0.06	0.14
M500b	0.53	0.40	0.27	0.08	0.20

Tab. 4.22: riduzione della corrente di cuscinetto con l'uso di cuscinetti o sedi isolate per differenti spessori di isolamento

L'induzione di correnti circolanti sul cuscinetto può essere descritta attraverso un modello alle correnti parassite ed i parametri di un circuito elettrico equivalente derivato dal modello.

Gli anelli di rame per la misura delle correnti di cuscinetto riducono le correnti circolanti dal 10% al 40% circa, a seconda della frequenza della corrente e della permeabilità relativa del pacco di laminazione di statore.

Anche l'influenza dei cuscinetti isolati sull'anello esterno o delle sedi interne rivestite può essere calcolata utilizzando il circuito equivalente.

Uno spessore minimo del rivestimento isolante di 250 μm è richiesto per ottenere una riduzione di corrente fino a meno del 30%.

5. CORRENTI DI CUSCINETTO E DI TERRA NEI SISTEMI DI AZIONAMENTO

Sono state fatte molte indagini per studiare e comprendere questi fenomeni che si verificano nei moderni azionamenti elettrici con inverter.

Con i piccoli motori della potenza nominale tra 1kW e 15kW [11] erano state riportate solo correnti capacitive e correnti EDM, mentre non si erano verificate correnti di cuscinetto circolanti.

Dall'altro lato, risultati di misura su motori più grossi (sopra 150kW) mostravano una considerevole corrente circolante specialmente a basse velocità del motore, quando il film lubrificante dei cuscinetti è piuttosto sottile. In alcuni di questi casi, nessuna corrente di scarica si verificava; in altri correnti di tipo EDM erano state misurate ma le ampiezze delle correnti circolanti erano più rilevanti.

Soltanto una ricerca di laboratorio riportava delle misure eseguite con motori più piccoli tra 30 e 70kW [12] ed un motore più grande (355kW). Qui di nuovo, i motori di piccola potenza mostravano solo correnti EDM, mentre quello più grande soffriva di correnti circolanti.

Perciò, studi sistematici sotto le stesse condizioni e con tecniche di misura identiche sono stati necessari per mostrare l'influenza nonché l'impatto delle dimensioni del motore e degli altri parametri del sistema di azionamento sui meccanismi delle correnti di cuscinetto. Soprattutto, il *concetto di messa a terra* del motore ha un'influenza aggiuntiva e significativa sull'ampiezza delle correnti di cuscinetto. Quindi, dovrebbero essere considerati diversi concetti di messa a terra.

Per cui si riportano i risultati effettuati all'interno di uno studio sistematico su motori di tre livelli di potenza (11kW – 110kW – 500kW), contenente il funzionamento con diversi inverter, cavi, filtri e tipi di cuscinetti [13], [14]. In particolare, come indicato precedentemente, la configurazione di messa a terra dell'azionamento è molto importante.



Questo permette di valutare e comprendere i fenomeni delle correnti di cuscinetto nei sistemi di azionamento a velocità variabile, principalmente con motori ad induzione a gabbia di scoiattolo.

5.1 Influenza delle dimensioni e velocità del motore e della temperatura di cuscinetto

I risultati sull'influenza della taglia del motore, velocità del motore n e temperatura di cuscinetto θ_b sui fenomeni di corrente di cuscinetto ottenuti sono veri per tutte le combinazioni inverter-motore per livello di potenza, con l'utilizzo di cavi del motore sia schermati che non schermati, per tutte le lunghezze del cavo del motore e per tutte le configurazioni di messa a terra sotto esame.

Perciò, per ogni livello di potenza, viene riportata una figura come esempio mostrando i valori delle correnti di cuscinetto i_b come funzione della velocità del motore n e della temperatura del cuscinetto θ_b per una particolare combinazione inverter-motore.

I motori piccoli (11kW) mostrano principalmente correnti di tipo *EDM* che si verificano come bruschi impulsi di corrente nei momenti di guasto della tensione di cuscinetto, mentre nei motori più grandi (110kW e 500kW) sono dominanti le *correnti circolanti*, che aumentano con il crescere delle dimensioni del motore.

Le correnti EDM mostrano un'ampiezza massima ad una certa velocità del motore; questo massimo decresce ed è spostato verso velocità del motore più elevate con l'aumento della temperatura di cuscinetto a causa della riduzione della viscosità dell'olio, che conduce ad una riduzione dello spessore del film lubrificante (Fig. 5.1).

Le correnti circolanti sul cuscinetto invece sono massime alle basse velocità, decrescendo con l'aumento della velocità del motore ed aumentando con l'aumento della temperatura di cuscinetto (Fig. 5.2 e 5.3).

La dimensione del motore ha un'influenza importante sulla natura delle correnti di cuscinetto che si verificano e sulle grandezze delle correnti di cuscinetto e di terra.

Per motori piccoli solo correnti EDM si verificano mentre con motori grossi si osservano correnti circolanti sul cuscinetto.

La velocità del motore e la temperatura di cuscinetto influenzano principalmente la grandezza delle correnti di cuscinetto che si verificano ad ogni livello di potenza.

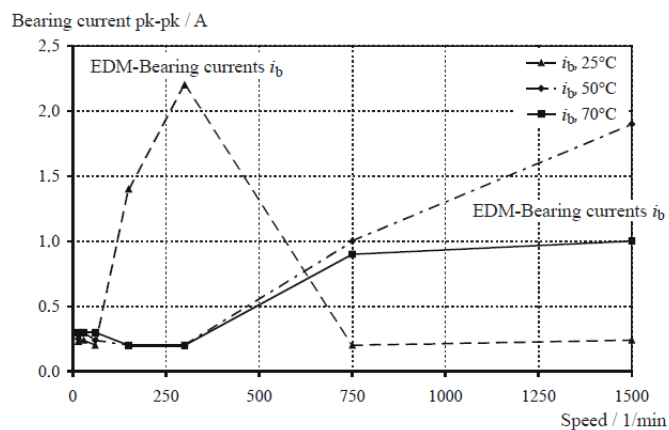


Fig. 5.1: livello di potenza 11kW: correnti di cuscinetto

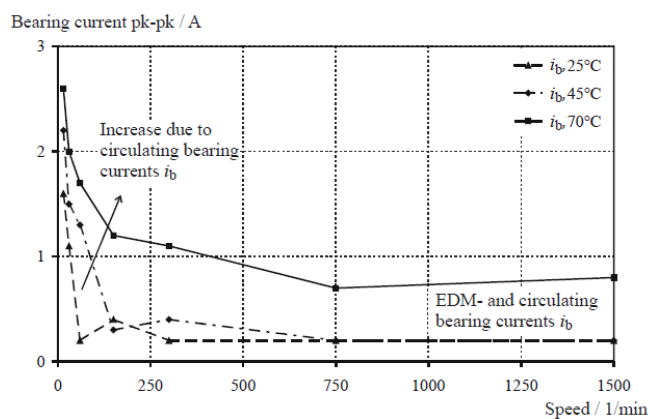


Fig. 5.2: livello di potenza 110kW: correnti di cuscinetto

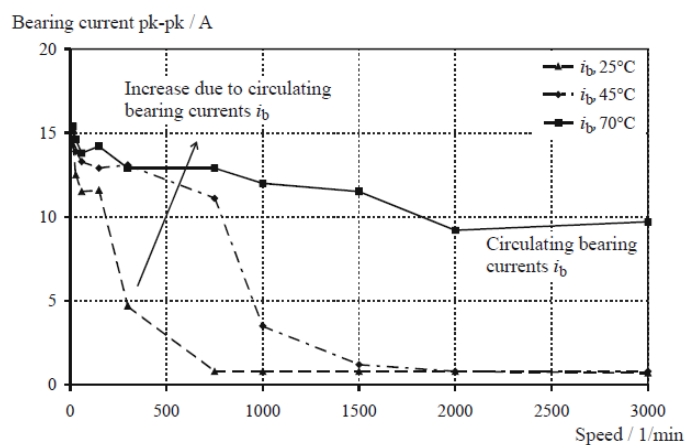


Fig. 5.3: livello di potenza 500kW: correnti di cuscinetto

5.2 Influenza delle combinazioni inverter-motore

L'influenza della combinazione inverter-motore sulle correnti di cuscinetto i_b e di terra di statore i_g è mostrata in Fig. 5.4, al livello di potenza 11kW e 110kW.

Per le correnti EDM, nessuna influenza significativa del tipo di inverter sull'ampiezza della corrente di cuscinetto esiste, perché tutti gli inverter – indipendentemente dalla loro frequenza di commutazione, strategia di controllo e dv/dt – danno luogo allo stesso picco di tensione di modo comune v_{com} , che determina attraverso il BVR la tensione del cuscinetto v_b (Fig. 5.4a).

A basse velocità del motore – a causa del contatto parzialmente metallico nei cuscinetti – sono visibili correnti capacitive di modo comune sul lato NDE e DE, ma non correnti EDM.

Sul livello di potenza 110kW (Fig. 5.4b), per elevate velocità del motore, quando il film di lubrificazione è relativamente spesso, si presentano alcune correnti EDM ed alcune piccole *correnti circolanti*. Nessuna grande influenza dell'inverter esiste sulle correnti di cuscinetto.

A basse velocità del motore, quando le correnti circolanti dominano, la dv/dt della forma d'onda di tensione ai terminali del motore presenta una influenza importante. In particolare, l'influenza del filtro dv/dt dell'inverter U110c mostra una considerevole riduzione delle correnti di cuscinetto di più del 50%.

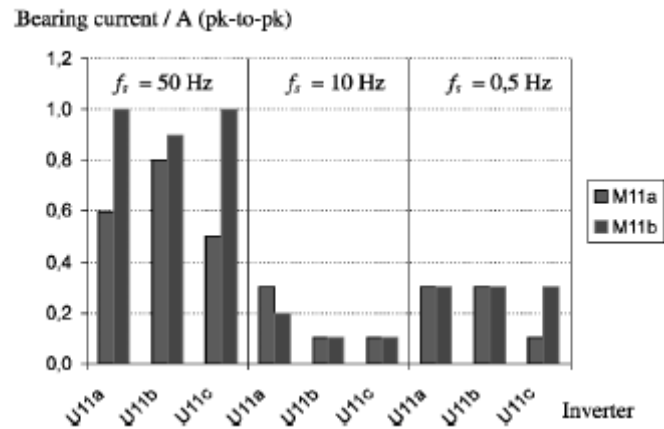
Nella Tabella è mostrata l'influenza del filtro dv/dt all'uscita dell'inverter sulla corrente di terra di statore e perciò sulla corrente circolante sul cuscinetto.

Quando i motori a 110kW funzionano senza il filtro, la corrente di cuscinetto è nello stesso range di quando opera con gli altri due tipi di inverter; quando lavorano con il filtro, è ridotta del 50% circa, a causa della riduzione della dv/dt .

Per un dato livello di potenza, i risultati riguardanti la natura delle correnti di cuscinetto e l'influenza di velocità del motore e temperatura del cuscinetto sono validi per tutte le combinazioni inverter-motore.

Solo se l'inverter contiene un filtro di uscita addizionale per ridurre la dv/dt , le correnti circolanti dei grandi motori possono essere ridotte fino a più della metà.

a)



b)

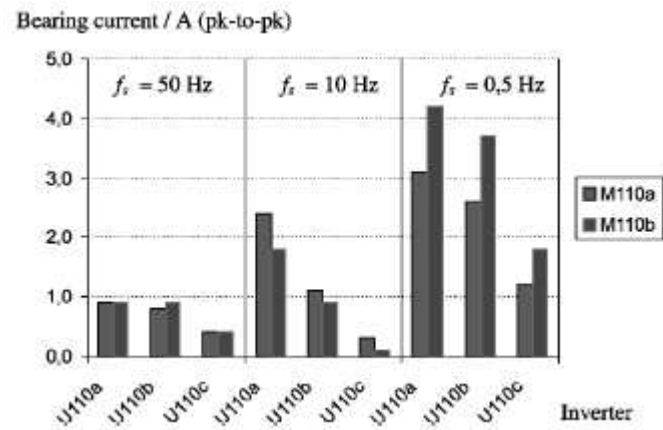


Fig. 5.4: correnti di cuscinetto (picco-picco), inverter U11c e U110c con filtro dv/dt .
a) livello 11kW b) livello 110kW

Motor	Without dv/dt -filter		With dv/dt -filter	
	i_b	i_g	i_b	i_g
M110a	3.0	16.2	1.2	10.2
M110b	3.5	24.7	1.8	10.6

Tabella: influenza del filtro dv/dt sull'ampiezza della corrente i_b e della corrente di terra di statore i_g

5.3 Influenza della frequenza di commutazione

In Fig. 5.5 viene presentata l'influenza della frequenza di commutazione f_c degli elementi dell'inverter per una certa configurazione inverter-motore ai livelli di potenza 11kW e 110kW.

Le ampiezze delle correnti di cuscinetto EDM non sono influenzate dalla frequenza di commutazione; quelle delle *correnti circolanti* rimangono quasi insensibili, quando si confrontano con l'influenza degli altri parametri del sistema descritti precedentemente.

Per una data configurazione, la frequenza di commutazione non influenza significativamente l'ampiezza delle correnti di cuscinetto.

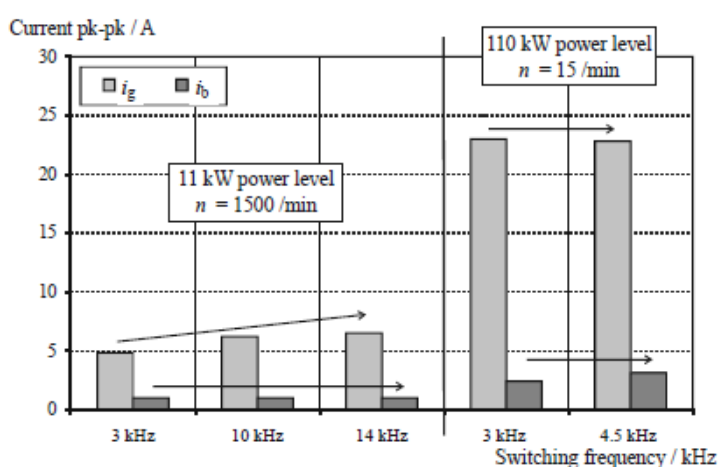


Fig. 5.5: influenza della frequenza di commutazione sulle correnti di terra e di cuscinetto

5.4 Influenza del tipo di cavo (schermato – non schermato)

Il tipo di cavo influenza notevolmente il funzionamento del motore e quindi il fenomeno delle correnti di cuscinetto.

L'uso di cavi del motore schermati anziché non schermati non è una tecnica di attenuazione affidabile per le correnti di tipo *circolante*: a causa dell'impedenza di messa a terra più bassa di questo tipo di cavo le correnti di terra di statore i_g aumentano. Questo si traduce in un flusso più elevato intorno all'albero che induce maggiori correnti circolanti sul cuscinetto, soprattutto a velocità del motore più elevate ($n \geq 1000$ /min).

Le correnti di tipo EDM, poiché non sono correlate alla corrente di terra di statore, non sono influenzate dall'uso di cavi schermati anziché non schermati.

La situazione è differente per le *correnti di terra di rotore* che, come visto, possono assumere valori particolarmente elevati. Queste correnti si verificano quando il rotore è messo a terra e si utilizzano cavi non schermati. Quando un cavo schermato viene utilizzato per l'alimentazione del motore, nessuna corrente addizionale di terra di rotore scorre nel caso di rotore messo a terra (Fig. 5.6, 5.7).

L'utilizzo di un cavo schermato anziché di uno non schermato aumenta di una buona percentuale le correnti di terra di statore.

Il tipo di cavo non influenza le correnti di cuscinetto EDM dei motori piccoli, ma comporta un aumento delle correnti circolanti sul cuscinetto ad elevate velocità dei motori più grandi.

Se si usa un cavo non schermato elevate correnti di terra di rotore passano nei cuscinetti, mentre se utilizziamo un cavo schermato sono quasi eliminate.

L'influenza del tipo di cavo è più piccola di quella delle dimensioni del motore.

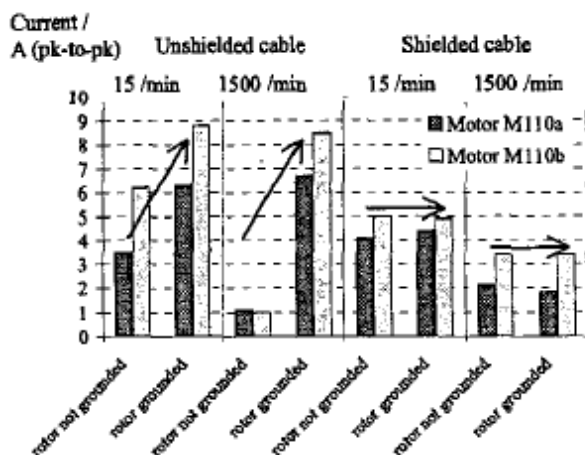


Fig. 5.6: livello di potenza 110kW:
correnti di cuscinetto per rotore a terra e non a terra con l'uso di cavo schermato e non schermato

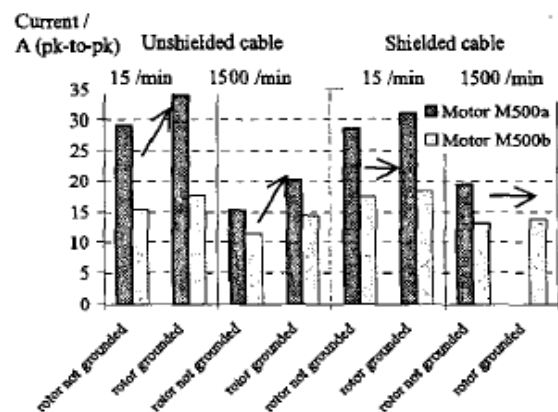


Fig. 5.7: livello di potenza 500kW:
correnti di cuscinetto per rotore a terra e non a terra con l'uso di cavo schermato e non

5.5 Influenza della lunghezza del cavo del motore

La lunghezza del cavo del motore, sia schermato che non schermato, non influisce in modo significativo sulle correnti di cuscinetto e di terra di statore ai diversi livelli di potenza.

Nella maggior parte dei casi (11kW - 110kW) riduzioni della lunghezza del cavo del motore portano ad un aumento della corrente di terra di statore; questo non vale per il livello 500kW.

Comunque la riduzione della lunghezza del cavo non influenza le correnti di tipo EDM e lascia praticamente inalterate le correnti circolanti sul cuscinetto che si verificano a basse velocità nei motori grossi.

L'influenza della lunghezza del cavo del motore è più piccola di quella del tipo di cavo ed è molto inferiore dell'impatto delle dimensioni del motore in generale.

5.6 Influenza della configurazione di messa a terra

La configurazione di messa a terra, come detto, ha un'influenza significativa sull'ampiezza delle correnti di cuscinetto. I risultati di misura con differenti configurazioni di messa a terra E1, E2 ed E3 (Fig. 5.8) non mostrano una grande influenza sulle correnti di cuscinetto per il livello di potenza più basso. Questo è in accordo con la teoria che le correnti di tipo *EDM* non sono correlate alla corrente di terra di statore. Infatti, le correnti EDM in configurazione E1 ed E3 sono quasi le stesse.

Tuttavia, sempre secondo la teoria, la situazione è differente per le *correnti circolanti* sul cuscinetto del livello di potenza 110kW. Infatti una riduzione della corrente di terra di statore nella configurazione E2, quando si confronta con E1, permette una riduzione anche della corrente di cuscinetto del 50%!

Per entrambi i livelli di potenza, 11kW e 110kW, è stata calcolata l'area dell'ellisse Hertziana. Con un limite assunto di $J_b = 0.3 \text{ A/mm}^2$ come densità di corrente critica del cuscinetto, è stata calcolata un'ampiezza di picco di 1A per i motori di 11kW e 3A per i motori di 110kW. Questo corrisponde ad 1.5A e 4.5A picco-picco rispettivamente.

Secondo le Fig. 5.1-5.2 e 5.4, questi valori non sono superati. Quindi, le combinazioni inverter-motore considerate in questo studio con collegamenti di terra E1-E3 possono essere considerate come configurazioni del sistema di azionamento sicure.

Dall'altro lato, classificando le correnti addizionali di cuscinetto indotte dall'inverter abbiamo detto che le situazioni più pericolose si verificano quando la *corrente di terra* passa nei cuscinetti attraverso un buon collegamento di terra del rotore. Questa situazione è data dalla configurazione E4 (albero del rotore collegato a terra).

La Fig. 5.9 mostra le correnti di terra di statore e di rotore e le correnti di cuscinetto al DE e al NDE. Qui una parte della corrente di terra passa nei cuscinetti ed in entrambi i casi supera i limiti sopraindicati. Tuttavia, le densità di corrente calcolate sono al di sotto di $J_b = 0.7 \text{ A/mm}^2$.

Correnti di cuscinetto più grandi dovute a correnti di terra di rotore con conseguenti densità di corrente più elevate scorreranno se non c'è un adeguato collegamento di terra di statore.

In conclusione, la messa a terra del rotore come la configurazione E4 dovrebbe essere evitata!

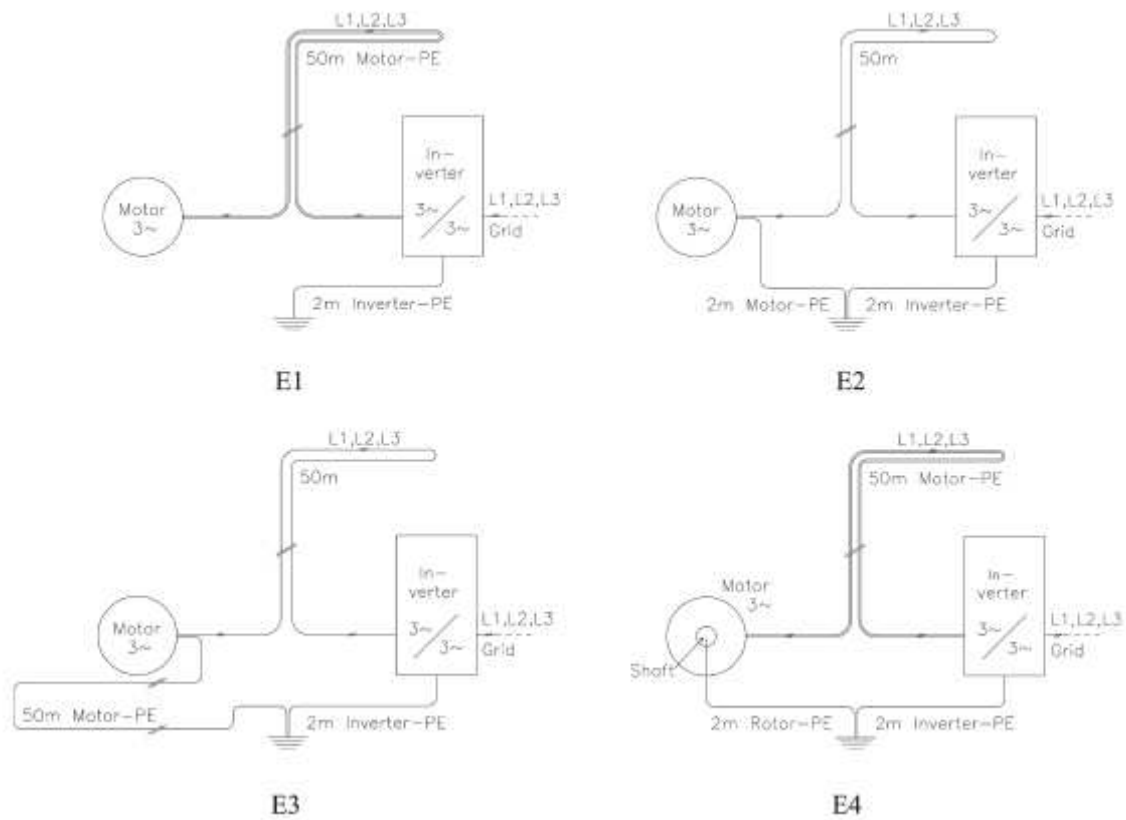
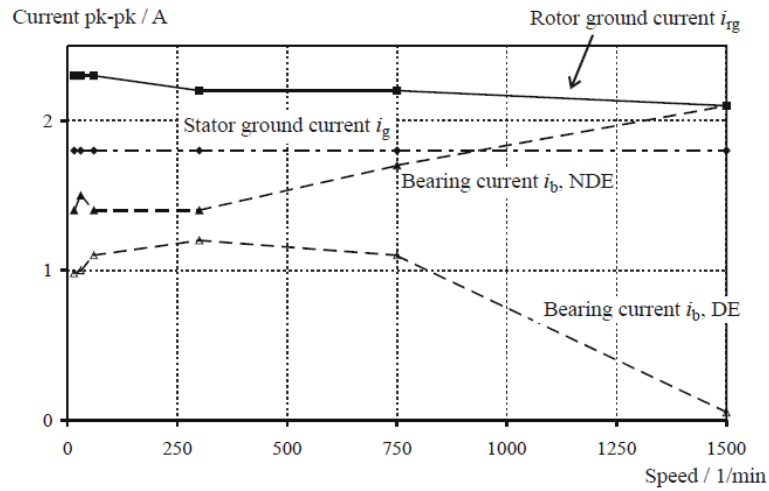


Fig. 5.8: differenti configurazioni di messa a terra E1, E2, E3 ed E4

a)



b)

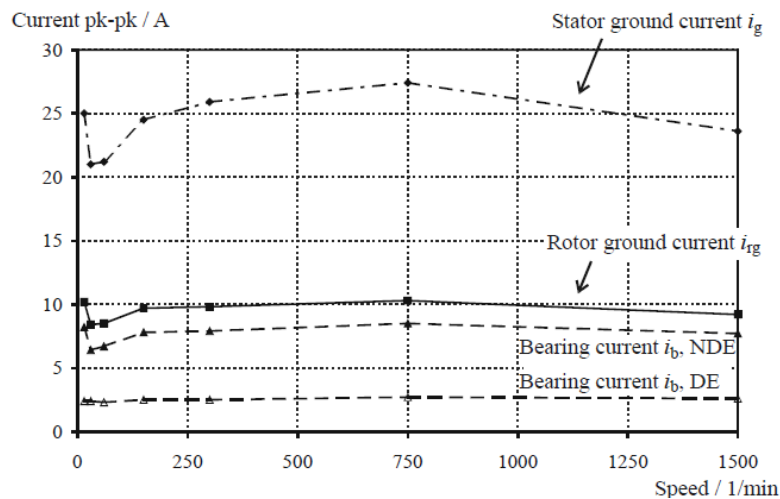


Fig. 5.9: correnti di cuscinetto (picco-picco), configurazione di messa a terra E4,
a) livello di potenza 11kW; b) livello di potenza 110kW

Se il rotore non è a terra (come nelle configurazioni E1, E2 ed E3), la configurazione di messa a terra dello statore non influenza le correnti EDM dei motori piccoli.

Le correnti circolanti sul cuscinetto dei motori grossi dipendono dalle correnti di terra di statore. La riduzione di queste due correnti può essere fino al 50% a seconda del tipo di configurazione dell'azionamento che si utilizza.

6. INFLUENZA DELLE TECNICHE DI ATTENUAZIONE COMUNI

6.1 Rassegna delle principali tecniche di attenuazione

Esistono diverse tecniche di attenuazione che sono state proposte per eliminare queste correnti di cuscinetto. Possono essere divise in due gruppi, a seconda della loro funzione:

→ Il primo gruppo comprende le *tecniche di attenuazione lato inverter*. Queste includono:

- filtri di uscita dell'inverter, come reattori dv/dt , filtri sinusoidali, filtri dv/dt ed induttori di modo comune;
- speciali tecniche di modulazione della tensione e filtri di modo comune per ridurre o eliminare la tensione di modo comune, diminuzione della frequenza portante;
- possono anche essere inclusi cavi particolari, come i cavi schermati (→ Par. 5.4).

→ Il secondo gruppo è costituito da *contromisure contro le correnti di cuscinetto all'interno o sul motore*. Tali misure includono:

- cuscinetti isolati ("rivestiti"),
- cuscinetti ibridi o ceramici,
- accoppiamenti isolati,

- grasso a bassa impedenza,
- spazzole di messa a terra dell'albero, e
- rotore schermato elettrostaticamente.

L'effetto delle diverse tecniche di attenuazione dipende soprattutto dal tipo di corrente di cuscinetto che potrebbe essere pericolosa per il motore e quindi deve essere ridotta o soppressa.

Le seguenti tecniche di attenuazione e la loro influenza sul fenomeno delle correnti di cuscinetto sono state scelte all'interno dello studio sistematico effettuato sui motori di tre livelli di potenza citato in precedenza:

- elementi di protezione all'uscita dell'inverter (filtri dv/dt integrati, Par. 5.2),
- reattori dv/dt e filtri sinusoidali (Par. 6.3),
- induttori di modo comune (Par. 6.3),

- cavi del motore schermati (Par. 5.4),
- cuscinetti isolati (Par. 6.4),
- cuscinetti ibridi (Par. 6.5).

- Il grasso a bassa impedenza non è stato studiato poiché le proprietà elettriche e meccaniche del lubrificante devono essere discusse con il fornitore del grasso di lubrificazione. Inoltre, lo svantaggio associato al suo utilizzo è che la vita del cuscinetto può diminuire di all'incirca un fattore di tre quando è confrontato con il grasso convenzionale.

- Le spazzole di messa a terra dell'albero forniscono un percorso parallelo al cuscinetto a bassa impedenza dall'albero del motore al telaio (frame) che elimina la tensione all'albero e le correnti di cuscinetto; tuttavia, richiedono manutenzione e non sono perciò una buona soluzione specie per le macchine più piccole.

6.2 Funzione di base dei filtri

Esaminiamo la forma principale dei diversi filtri di uscita dell'inverter.

- ❖ I **reattori dv/dt** contengono tre bobine che sono inserite all'interno delle fasi del motore (Fig. 6.1a). La funzione di questi reattori è di aumentare il tempo di salita della tensione t_r e di ridurre perciò il tasso di variazione della tensione dv/dt (Fig. 6.1b).

Il tempo di salita t_r aumenta con L , perciò la caduta di tensione nominale sul reattore v_k , determinata alla frequenza nominale del motore f_{sr} , deve essere relativamente grande.

$$v_k = \frac{V_k}{V_{sr}} = 2\pi f_{sr} L \frac{I_r}{V_{sr}} \propto L \quad (6.1)$$

dove: v_k = caduta di tensione nominale sul reattore, V_{sr} = tensione nominale del motore,

V_k = caduta di tensione sul reattore (val. eff.), f_{sr} = frequenza nominale,

I_r = corrente nominale (val. eff.).

Il valore di v_k varia tipicamente tra il 2 e l'8%.

Questi reattori dv/dt sono stati originariamente progettati per ridurre le correnti capacitive nel cavo del motore. Poiché la capacità del cavo aumenta con la lunghezza l_c , questi reattori sono raccomandati specialmente per cavi del motore lunghi. La corrente capacitiva del cavo lo carica termicamente ma non raggiunge il motore. Con la riduzione della dv/dt , queste correnti sono ridotte allo stesso modo.

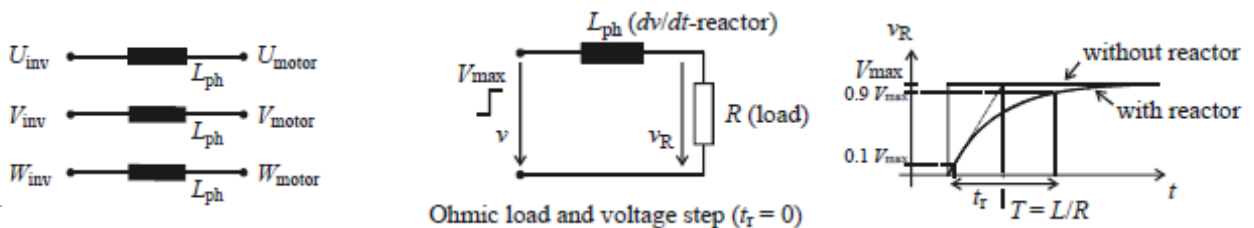


Fig. 6.1: a) modello principale di un reattore dv/dt ; b) esempio di base della sua funzione

- ❖ I **filtri sinusoidali** sono costituiti da tre reattori di fase (con un'induttanza di fase L_{ph}) e condensatori (con capacità linea-terra C_{Lg} o capacità linea-linea C_{LL}) che formano un filtro passa-basso (Fig. 6.2). Le tensioni con frequenza al di sotto della frequenza di risonanza f_0 passano quasi senza riduzione di ampiezza, mentre i segnali di tensione con $f > f_0$ sono diminuiti con $1/f^2$, quindi con 40 db/decade.

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_{ph}C_{Lg}}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{3L_{ph}C_{LL}}} \quad (6.2)$$

dove: f_o = frequenza di risonanza del filtro,
 L_{ph} = induttanza di fase reattore,
 C_{Lg} = capacità del condensatore linea-terra,
 C_{LL} = capacità del condensatore linea-linea.

Di solito questi filtri sono progettati nel seguente modo: la frequenza di risonanza f_o deve essere ben al di sopra della frequenza fondamentale dell'inverter che aziona il motore e ben al di sotto della frequenza di commutazione dell'inverter f_c per ridurre i ripple di corrente in alta frequenza che possono causare perdite aggiuntive nel motore e rumore.

La tensione linea-linea v_{LL} è quasi idealmente sinusoidale ai terminali del motore. I due parametri L_{ph} e C_{Lg} , rispettivamente C_{LL} , possono essere scelti. Di solito il primo è scelto come un valore molto più basso di quello con reattori dv/dt al fine di evitare l'indesiderata caduta di tensione v_k .

Di conseguenza i valori delle due capacità devono essere aumentati.

Un filtro sinusoidale agisce principalmente sulla tensione linea-linea v_{LL} ; la tensione di modo comune v_{com} non è soppressa. I filtri sinusoidali sono di solito molto grandi e costosi, poiché la potenza apparente totale delle armoniche di tensione determina la tensione nominale.

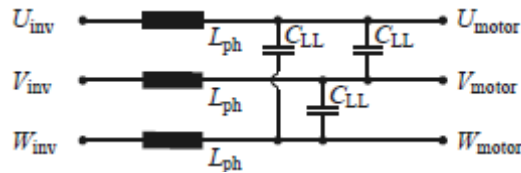


Fig. 6.2: modello principale di un filtro sinusoidale

- ❖ I **filtri dv/dt** sono componenti RLC con resistenze aggiunte per attenuare le componenti in alta frequenza (Fig. 6.3). Un'enorme varietà di filtri dv/dt è disponibile per soddisfare differenti specifiche tecniche. Questi filtri spesso sono circuiti complessi, alcuni comprendenti una connessione al link DC dell'inverter. La differenza principale in confronto ai filtri sinusoidali è che la frequenza di risonanza f_o è molto più elevata della frequenza di commutazione dell'inverter f_c , dovuta di solito all'utilizzo di valori piccoli di L e C. Perciò solo la dv/dt è ridotta, ma le tensioni di uscita dell'inverter v_{LL} e v_{Lg} sono ancora un modello di impulso.

Un vantaggio dei filtri dv/dt è che, a causa dei solitamente piccoli valori di L e C, il filtro stesso è piccolo e piuttosto economico.

Perciò, un induttore di modo comune rappresenta un'induttanza di modo comune L_{com} in questo sistema. Il suo valore è dato da:

$$L_{\text{com}} = \frac{\lambda}{I_{\text{com}}} = \frac{N_c \cdot B \cdot A_c}{I_{\text{com}}} = \frac{N_c \cdot \mu \cdot H \cdot A_c}{I_{\text{com}}} = \frac{N_c^2 \cdot \mu \cdot A_c}{\pi \cdot d_c} \quad (6.3)$$

dove: λ è il collegamento di flusso totale, la permeabilità μ è data dalla permeabilità dell'aria μ_o e quella relativa del materiale del nucleo μ_r ($\mu = \mu_o \mu_r$).

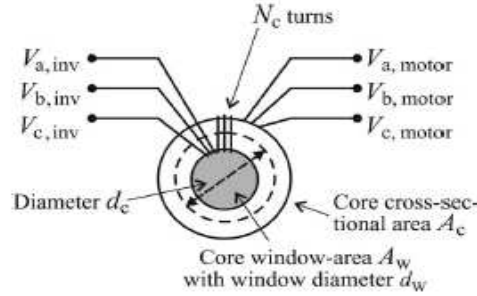


Fig. 6.4: induttore di modo comune avvolto

Questi induttori avvolti possono effettivamente ridurre la corrente di modo comune. Comunque, l'inserzione di queste induttanze all'uscita dell'inverter non è idealmente semplice. I conduttori del motore devono essere interrotti per essere connessi all'induttore avvolto e ogni fase dell'avvolgimento dell'induttore deve portare la corrente nominale del motore. Per cui l'induttore cresce in volume ed in peso e diviene sempre più ingombrante con l'aumento delle dimensioni del motore.

Un'alternativa piuttosto semplice è fornita dagli induttori passanti che sono costituiti sempre da un nucleo toroidale inserito intorno ai conduttori del motore (Fig. 6.5).

In tal caso l'apparecchiatura addizionale non contiene alcun avvolgimento ma i conduttori del motore costituiscono l'avvolgimento dell'induttore che ha solo una spira ($N_c = 1$).

L'induttanza di modo comune di tale induttore con nucleo toroidale è dato dalla formula suddetta ponendo $N_c = 1$:

$$L_{\text{com}} = \frac{N_c^2 \cdot \mu \cdot A_c}{\pi \cdot d_c} \Big|_{N_c=1} = \frac{\mu \cdot A_c}{\pi \cdot d_c} \quad (6.4)$$

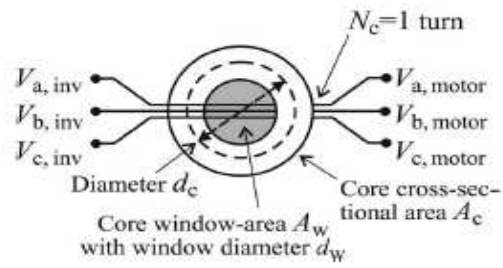


Fig. 6.5: induttore di modo comune passante

In ogni caso gli induttori di modo comune introducono solo un'impedenza più elevata nel sistema di sequenza omopolare, quindi sopprimono le correnti di modo comune ma non la tensione di modo comune v_{com} . Quindi questa tensione rimane inalterata.

6.3 Influenza dei filtri

I risultati che si ottengono utilizzando diversi filtri di uscita dell'inverter sono mostrati qui sotto. Questi sono filtri dv/dt (livello di potenza 11kW) e reattori dv/dt (110kW e 500kW), filtri sinusoidali ed induttori di modo comune. E' importante notare che tutti i filtri sono componenti passivi e nessun filtro contiene una connessione diretta al link dc dell'inverter.

In particolare la loro influenza sulle correnti di cuscinetto dipende fortemente dal tipo di corrente che si verifica. Tutti i filtri influenzano la dv/dt delle tensioni ai terminali del motore.

A seconda del tipo di filtro, la dv/dt ai terminali del motore è ridotta notevolmente: da $dv/dt \geq 1.5$ kV/ μ s fino a $dv/dt \leq 0.5$ kV/ μ s (Fig. 6.6 e 6.7).

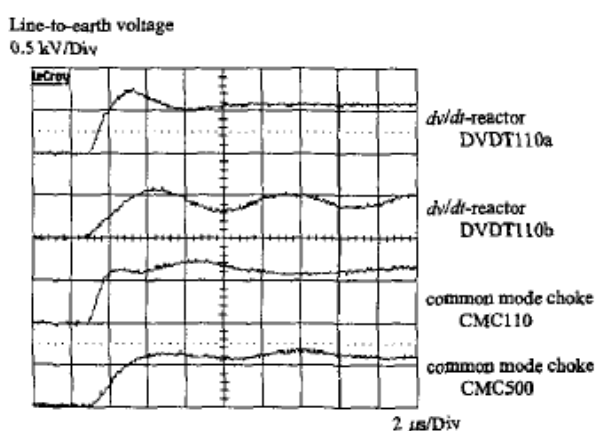


Fig. 6.6: livello 110kW:
tensione linea-terra con funzionamento con filtro

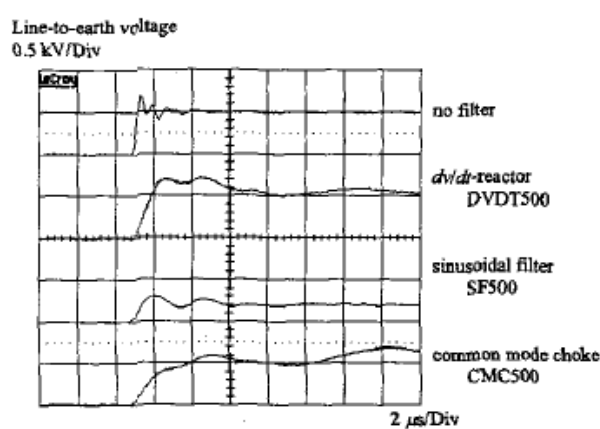


Fig. 6.7: livello 500kW:
tensione linea-terra con funzionamento con filtro

Poiché la dv/dt della tensione di modo comune ai terminali del motore ha un elevato impatto sulla generazione della corrente di terra i_g , anche queste correnti sono significativamente influenzate con funzionamento con filtro (Fig. 6.8 e 6.9).

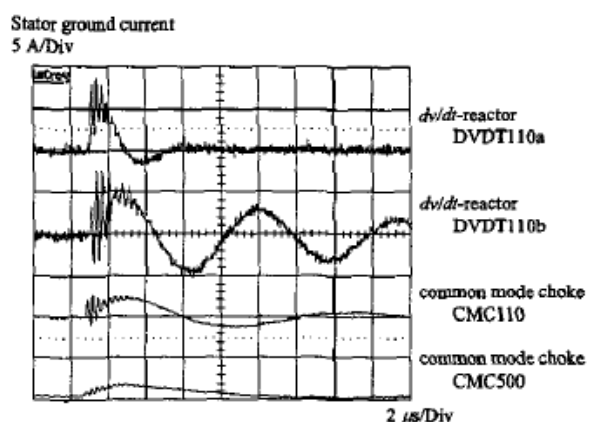


Fig. 6.8: livello 110kW:
correnti di terra di statore con filtro

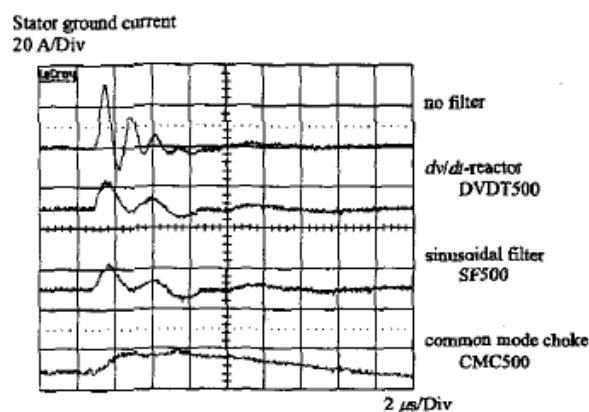


Fig. 6.9: livello 500kW:
correnti di terra di statore con filtro

Questo comporta una riduzione delle correnti di terra di statore (per tutti e tre i livelli di potenza studiati) di circa il 30...50% per i filtri dv/vt , reattori dv/dt e filtri sinusoidali e fino al 90% con gli induttori di modo comune.

Come possiamo vedere, si nota l'efficacia degli induttori di modo comune nel ridurre la corrente soprattutto quando sono utilizzati all'uscita dell'inverter di "grandi" azionamenti (110kW e 500kW).

Poiché le *correnti circolanti* sul cuscinetto sono indotte dalle correnti di terra di statore questo si traduce in una riduzione delle ampiezze delle correnti circolanti dei motori di elevata potenza di circa la stessa entità (Fig. 6.10 e 6.11).

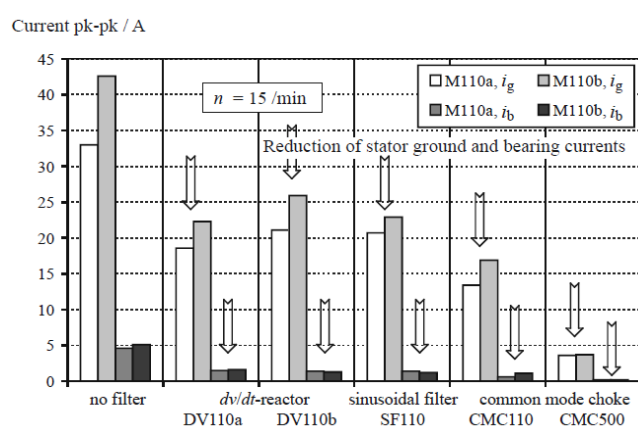


Fig. 6.10: livello 110kW:
correnti di terra di statore e di cuscinetto con filtro

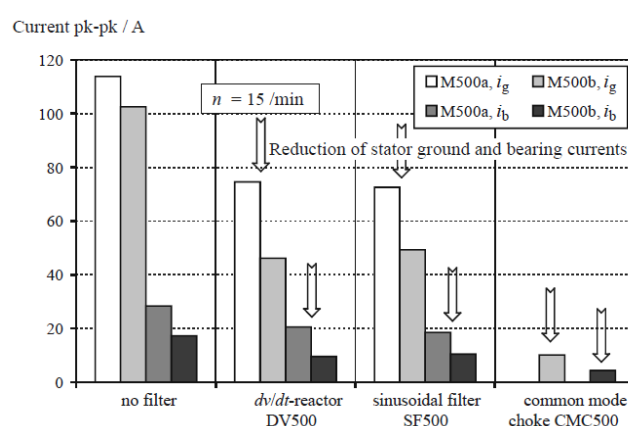


Fig. 6.11: livello 500kW:
correnti di terra di statore e di cuscinetto con filtro

Al livello di potenza 110kW, nessuna corrente circolante ma solo piccole, innocue correnti di cuscinetto di tipo EDM si verificano a velocità $n \geq 1000/\text{min}$. Questo è vero anche per il livello 500kW con funzionamento con induttori di modo comune.

Le correnti di cuscinetto di tipo EDM dei motori del livello di potenza più basso rimangono non influenzate per tutti i filtri studiati, dato che questi riducono la dv/dt ma non eliminano la tensione di modo comune. Per cui, l'accumulo di tensione sui cuscinetti rimane invariato.

Le *correnti di terra di rotore* sono ridotte della stessa entità e per lo stesso motivo come le correnti di terra di statore, quando si usano filtri.

Filtri che riducono la dv/dt della tensione di modo comune ai terminali del motore riducono le correnti di terra e perciò le correnti circolanti sul cuscinetto e le correnti di terra di rotore significativamente.

I filtri senza eliminazione della tensione di modo comune non riducono le correnti di tipo EDM. Un filtro che cancella le componenti in alta frequenza della tensione di modo comune sopprime tutti i tipi di corrente di cuscinetto.

6.4 Influenza dei cuscinetti isolati

I *cuscinetti isolati* (cosiddetti “rivestiti”) sono cuscinetti con tutti gli elementi in acciaio inossidabile che hanno uno strato isolante addizionale in corrispondenza della superficie esterna dell’anello (o guida) esterno del cuscinetto. Il rivestimento è costituito da un materiale ceramico composto principalmente da ossido di alluminio. Lo spessore dell’isolamento è tipicamente (50...250) μm , a seconda del tipo di cuscinetto e del produttore.

Questi cuscinetti introducono un’impedenza nel percorso della corrente di cuscinetto; perciò tutti i tipi di corrente di cuscinetto sono significativamente ridotti.

Di seguito sono mostrati i risultati dell’influenza dei cuscinetti isolati ai vari livelli di potenza.

Con i motori piccoli (11kW) con un rivestimento di 50 μm , l’ampiezza delle correnti di cuscinetto EDM è ridotta fino a $\leq 60\%$ nel caso di un cuscinetto isolato e fino a $\leq 40\%$ nel caso di due cuscinetti isolati. Se si utilizza solo un cuscinetto isolato si verifica un aumento del flusso di corrente nel cuscinetto non isolato, accelerando il processo di usura di quest’ultimo (Fig. 6.12).

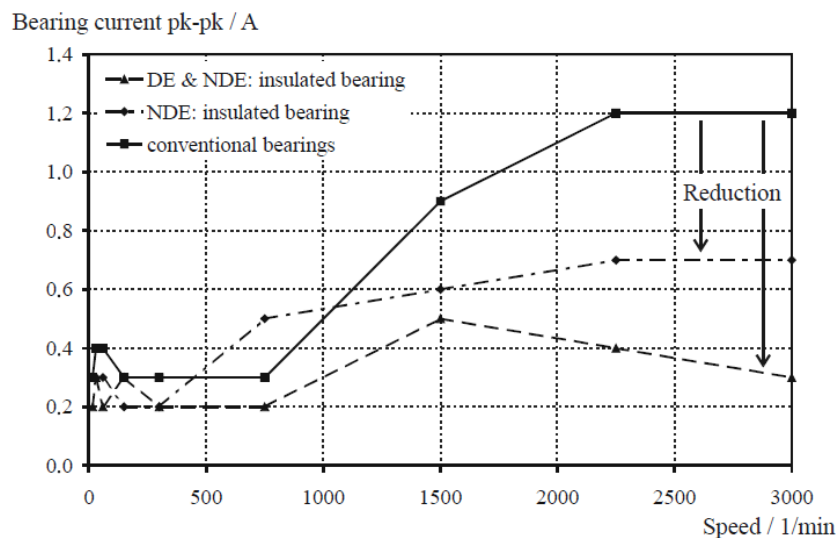


Fig. 6.12: correnti di cuscinetto con l’uso di cuscinetti isolati, motore con potenza 11kW

A questo livello di potenza, le ampiezze delle correnti EDM sono piuttosto piccole (intorno ad 1 A). Perciò, i cuscinetti rivestiti non sono generalmente richiesti per motori di queste dimensioni. Comunque possono essere utili per i motori più piccoli di 1kW con cuscinetti piccoli e piccole aree di contatto Hertziane A_H , dove le correnti EDM delle stesse ampiezze provocano densità di corrente J_b più elevate.

E’ importante notare anche, che le correnti di cuscinetto EDM sono misurate, come descritto nelle tecniche di misura, attraverso un isolamento ponte tra cuscinetto e scudo. Quindi, nessun

accesso diretto alla corrente di scarica all'interno del cuscinetto è possibile, che potrebbe essere un po' più grande del picco di corrente EDM misurato.

Con motori più grossi (livello di potenza 110kW e 500kW) aventi spessore dell'isolamento di 250 μm , le *correnti circolanti* sul cuscinetto sono notevolmente ridotte; nel caso di un cuscinetto isolato, sono ridotte fino a $\leq 40\%$, nel caso di due cuscinetti isolati fino a $\leq 20\%$ (Fig. 6.13 e 6.14).

Le correnti di cuscinetto misurate mostrano una riduzione delle correnti EDM fino a meno del 40% con l'uso di due cuscinetti isolati.

L'uso di un cuscinetto isolato riduce le correnti circolanti sul cuscinetto fino a meno del 40%, l'utilizzo di due cuscinetti isolati fino a meno del 20%.

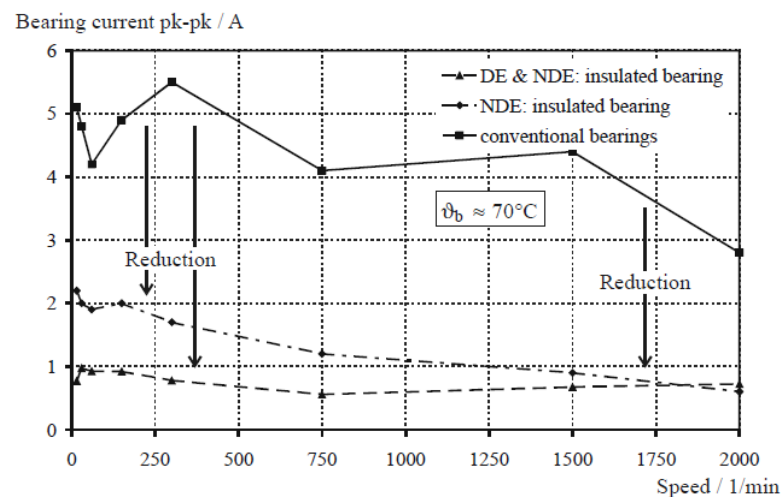


Fig. 6.13: correnti di cuscinetto con l'uso di cuscinetti isolati, motore con potenza 110kW

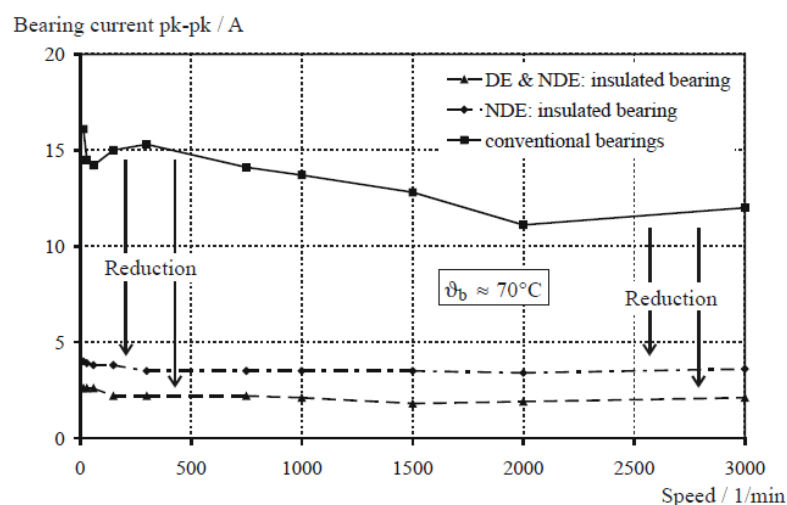


Fig. 6.14: correnti di cuscinetto con l'uso di cuscinetti isolati, motore con potenza 500kW

6.5 Influenza dei cuscinetti ibridi

I *cuscinetti ibridi* hanno gli anelli interni ed esterni in acciaio inossidabile e gli elementi volventi (rulli o sfere) di ceramica.

Le correnti di cuscinetto di tipo *EDM*, *circolante* e *di terra di rotore* sono completamente sopresse quando si utilizzano questi tipo di cuscinetti. Questa tecnica di attenuazione è raccomandata per piccoli motori ($< 1\text{kW}$), che soffrono correnti di cuscinetto EDM.

I cuscinetti ibridi non sono necessari per grossi motori che soffrono correnti circolanti sul cuscinetto; in tal caso sono sufficienti cuscinetti isolati più economici.

I cuscinetti ibridi eliminano i tre suddetti tipi di corrente. L'intero diametro delle sfere ceramiche infatti rappresenta la lunghezza del gap d'isolamento. La tensione del cuscinetto non è abbastanza grande per generare una sufficiente intensità di campo elettrico attraverso questa lunghezza per scaricare il film lubrificante. Nessuna corrente EDM si verifica.

Le sfere di ceramica fungono da isolamento elettrico ed interrompono le correnti circolanti sul cuscinetto.

7. TECNICHE DI ATTENUAZIONE INNOVATIVE

7.1 Applicazione della dissipazione di carica statica per attenuare le correnti di scarica elettrica (EDM)

Tra i diversi tipi di correnti di cuscinetto identificati ci concentriamo sulla mitigazione delle correnti di scarica di cuscinetto in alta frequenza che si verificano con i motori più piccoli, dell'ordine di alcuni kW. Le più comuni tecniche di attenuazione di questo tipo di correnti utilizzate con le applicazioni commerciali che abbiamo visto sono:

- 1) *Filtri della tensione di modo comune*: sono circuiti complessi progettati per ridurre o eliminare la tensione di modo comune, in particolare le sue componenti in alta frequenza. Questi sono un'aggiunta piuttosto costosa al sistema di azionamento; spesso sono applicati per attenuare il rumore elettromagnetico.
- 2) *Spazzole di carbone*: utilizzano grafite di carbone elettricamente conduttiva e forniscono una connessione elettrica tra l'albero del motore ed il telaio parallela al cuscinetto. Un film di grafite si deposita sull'area di contatto durante lo scorrimento. L'umidità crea uno strato d'acqua sulla grafite, rendendo perciò le spazzole stesse auto-lubrificate. I problemi comunemente citati sono un'usura eccessiva ed il mantenimento di un buon contatto elettrico alle alte frequenze che pone ulteriori sfide sul loro progetto e installazione.
- 3) *Cuscinetti ibridi / completamente ceramici*: hanno gli elementi volventi di ceramica e gli anelli in acciaio di qualità (lega o carbonio) oppure sia gli elementi rotanti che gli anelli ceramici, rispettivamente. Perciò introducono un ampio gap isolante all'interno del cuscinetto e prevengono scariche elettriche al suo interno. Questi cuscinetti sono particolarmente più costosi di quelli convenzionali di acciaio.

I punti di impatto di queste tecniche di attenuazione sulla catena fisica causa – effetto della corrente di cuscinetto EDM sono illustrati in Fig. 7.1.

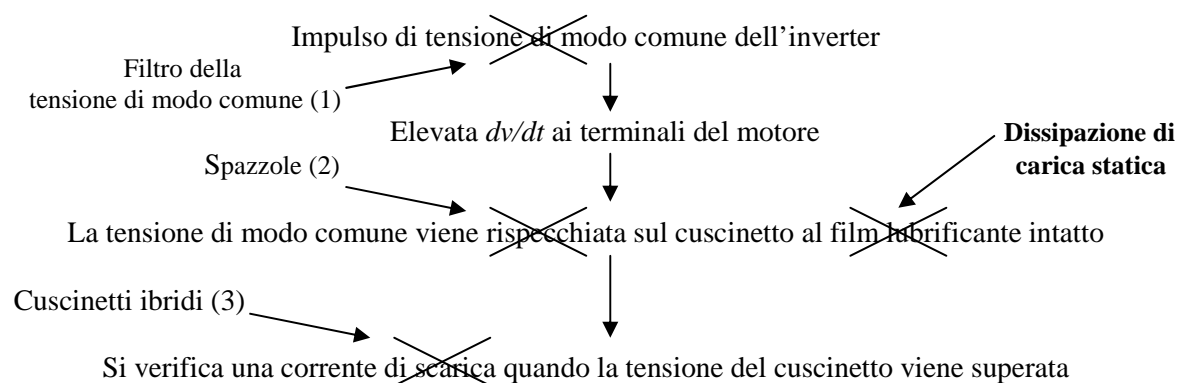


Fig. 7.1: punti di impatto delle diverse tecniche di attenuazione sulla catena fisica causa – effetto delle correnti di cuscinetto EDM

La tecnica di attenuazione proposta ha lo stesso punto di impatto delle spazzole, cioè previene l'accumulo di tensione ai capi dei cuscinetti. Tuttavia, in contrasto al meccanismo a molla delle convenzionali spazzole di carbone, la tecnica ha attrito bassissimo e usura trascurabile ed è relativamente robusta verso la contaminazione, e perciò, è libera da problemi che sono comunemente riportati con le spazzole. Inoltre è facile da installare ed efficiente.

Il contatto elettrico tra il telaio del motore e l'albero è stabilito utilizzando l'effetto di emissione di campo elettrico, che è uno dei meccanismi di scarica elettrostatica ESD.

Allo scopo di comprendere questa tecnica di attenuazione è importante essere a conoscenza del fatto che “contatto elettrico” non necessariamente significa anche “contatto meccanico”.

I meccanismi per ottenerlo sono diversi [16], ma quello che ci interessa capire è l'emissione di campo elettrico.

L'emissione di campo è una forma di incanalamento quantistico. E' il processo secondo cui gli elettroni passano attraverso una barriera in presenza di un elevato campo elettrico. Il potenziale a cui gli elettroni hanno sufficiente energia cinetica per farlo è comunemente denominato barriera di gap o funzione potenziale lavoro. Poiché l'energia cinetica dei portatori di carica ha una certa distribuzione sulla popolazione, alcuni di loro hanno abbastanza energia per attraversare il gap anche molto al di sotto della tensione di guasto.

L'equazione sottostante correla la corrente prima del guasto ed il campo elettrico o la tensione. La forma semplificata è data da:

$$I = aV^2 \exp\left(-\frac{b}{V}\right) \quad (7.1)$$

dove I è la corrente di emissione di campo, V è la tensione ed a e b sono costanti che contengono, tra gli altri, l'area di emissione, la funzione lavoro, il fattore di aumento di campo e funzioni del campo elettrico e della funzione lavoro che sono approssimate come costanti.

Il fattore di aumento di campo, comunemente denominato come β , include l'aumento di campo elettrico dovuto alla geometria β_g e dovuto ai picchi microscopici nella superficie di contatto β_m e può raggiungere più di due ordini di grandezza. Per cui,

$$V = d \frac{E_m}{\beta} \quad (7.2)$$

dove E_m è l'intensità di campo elettrico microscopico.

Gli elettroni derivanti dall'emissione di campo possono dare inizio ad un guasto elettrico che si verifica quando la densità di corrente di emissione di campo (a livello microscopico) supera un

valore critico. Questo guasto dovuto all'effetto dell'emissione di campo si verifica nei gap piccoli (da $\approx 5 \text{ nm}$ a $\approx 5 \mu\text{m}$).

♦ Con la nostra applicazione, non consideriamo la scarica elettrostatica (ESD) come un effetto distruttivo o non voluto, ma utilizziamo il fenomeno suddetto come un mezzo per scaricare la tensione ai capi del cuscinetto v_b attraverso un percorso parallelo. Perciò, preveniamo un guasto elettrico che si verifica al suo interno che potrebbe tradursi in un impulso di corrente di cuscinetto potenzialmente pericoloso (Fig. 7.1). Utilizzando ESD e l'effetto di emissione di campo come meccanismi per fornire un contatto elettrico, superiamo i problemi comunemente citati insieme alle spazzole di carbone a contatto meccanico.

I seguenti requisiti devono essere soddisfatti:

- 1) Localmente, l'intensità di campo elettrico per far avvenire il guasto dovuto all'emissione di campo deve essere raggiunta.
- 2) La tensione ai capi del cuscinetto deve essere scaricata attraverso un percorso parallelo prima che un guasto elettrico all'interno del cuscinetto si verifichi insieme ad un impulso di corrente EDM potenzialmente pericoloso.
- 3) I due poli devono avere un buon collegamento elettrico all'anello esterno ed interno del cuscinetto rispettivamente.

In modo simile come con le spazzole, l'ultimo requisito può essere ottenuto prendendo lo scudo della macchina e l'albero come due poli.

Al fine di soddisfare i primi due punti dovrebbe essere prevista una spaziatura di gap molto piccola ed una geometria che si traduce in un aumento di campo locale, come punte elettricamente conduttive con diametri molto piccoli. Approssimando, con $V_B/d \approx 100 \text{ V}/\mu\text{m}$ e diametro della punta $2 \mu\text{m}$, guasti a circa 2 V richiederebbero spaziature di gap di $0.02 \mu\text{m}$. Questo è ottenuto a rugosità superficiali molto basse che sono raggiunte con lucidatura o superfinitura, per cui non è direttamente applicabile qui come tale.

Tuttavia, rapporti V_B/d più bassi potrebbero essere raggiunti sfruttando l'influenza della concentrazione di campo locale con spigoli molto taglienti, e quindi, con punte più piccole.

In tal caso, un $V_B/d \approx 1 \text{ V}/\mu\text{m}$ può essere trovato a $0.02 \mu\text{m}$ di diametro della punta. Per cui, un guasto a circa 2 V richiederebbe spaziature di gap di $2 \mu\text{m}$. Questo è ottenuto a rugosità molto basse degli alberi della macchina. Sebbene una lucidatura superficiale potrebbe essere applicata all'albero della macchina, questo richiederebbe lavoro supplementare e la spaziatura di gap sarebbe difficile da mantenere durante le normali condizioni di funzionamento.

Sarebbe molto difficile – e per un applicazione commerciale probabilmente quasi impossibile – sviluppare un sistema di punte metalliche solide che dovrebbe essere mantenuto alla necessaria distanza dall'albero. Tuttavia, le microfibre conduttive forniscono una buona soluzione alternativa. Esse sono meccanicamente flessibili pur avendo alta resistenza ed alta rigidità.

Tali microfibre conduttive hanno diametri molto piccoli, meno di 10 μm . Sotto l'influenza di una tensione applicata, emettono corrente dovuta all'effetto di emissione di campo elettrico a causa del campo elettrico locale estremamente aumentato alle punte di fibra troncate.

A causa della loro struttura meccanicamente flessibile, se applicate con la corretta interferenza, le microfibre possono mantenere un contatto con la superficie, perciò compensando la rugosità superficiale dell'albero. Nonostante il movimento rotante dell'albero, le microfibre “vedono” solo un polo non rotante e la rotazione dell'albero della macchina non influenza la capacità funzionale delle fibre. Quando un gran numero di queste fibre è assemblato intorno all'albero della macchina, viene fornita un'alta densità di punti di contatto e molti percorsi paralleli sono forniti

1) sia per far passare la corrente

2) o per il verificarsi di un guasto.

1) Quando il contatto meccanico è anche elettricamente “buono”, la corrente fluisce attraverso le microfibre.

2) Quando le microfibre perdono il buon contatto elettrico attraverso il contatto meccanico, un guasto a causa dell'emissione di campo locale si verificherà da qualche parte lungo la circonferenza, perciò ristabilendo il contatto elettrico.

Al fine di soddisfare 1) le microfibre devono essere in grado di portare la corrente che è azionata dalla tensione ai capi del cuscinetto v_b . Questa corrente è principalmente una funzione di v_b ed R_f , la resistenza tra le microfibre e l'albero. Inoltre, per proteggere il cuscinetto, la resistenza deve essere così piccola che la tensione ai suoi capi non superi la tensione di guasto del cuscinetto.

In pratica, queste fibre adeguatamente progettate devono: portare la corrente in parallelo al cuscinetto e prevenire l'accumulo di tensione ai suoi capi; condurre al guasto nel momento in cui viene perso un “buon” contatto elettrico tra le fibre e l'albero.

Una vista della realizzazione di tale anello di microfibre conduttive e come viene montato sulla macchina è mostrato in Fig. 7.2.



Fig. 7.2: a) microfibre conduttive assemblate in anelli per formare i dispositivi di dissipazione di carica statica per attenuare le correnti di cuscinetto EDM; b) anello con microfibre conduttive montato sull'albero della macchina per ottenere la scarica della tensione ai capi del cuscinetto attraverso un percorso parallelo

Se adeguatamente progettate, l'interferenza tra le fibre e l'albero può avere attrito bassissimo, fornendo una tecnica che può essere considerata come esente da attrito di usura diretto. Inoltre, le fibre possono essere progettate per escludere contaminanti come quelli dati da ambienti oleosi, grassi, umidi e polverosi. Le fibre possono essere assemblate per dare un anello con un design piuttosto sottile che può essere montato sia sul drive-end che sul non drive-end della macchina con piastre rigide o staffe di montaggio, dove il contatto elettrico è assicurato con viti (Fig. 7.2b). Perciò, nessuna lavorazione è richiesta e l'installazione del dispositivo è relativamente semplice. Migliaia di anelli in microfibra sono stati installati in diverse applicazioni come cartiere e ospedali negli ultimi anni. Rapporti dal campo [16] hanno mostrato che l'anello di microfibra conduttiva è molto efficace ed è una soluzione economica negli azionamenti a frequenza variabile correlati al danno ai cuscinetti, permettendo di prevenire l'accumulo di una tensione di diversi volt ai suoi capi e quindi evitando il guasto o la rottura del cuscinetto.

Questa nuova tecnica di attenuazione per le correnti di cuscinetto EDM utilizza la dissipazione di carica statica; la tensione ai capi del cuscinetto è scaricata a livelli molto bassi e prima che si verifichi un guasto elettrico al suo interno. La tecnica è basata sull'effetto dell'emissione di campo, ha attrito bassissimo e usura trascurabile ed è molto robusta verso la contaminazione, quando è confrontata con le convenzionali spazzole di carbone.

Con questa tecnica, un'alta densità di punti di contatto dati da un gran numero di microfibre conduttive disposte in parallelo al cuscinetto attraverso un anello è utilizzata per fornire numerosi percorsi per far passare la corrente al di fuori del cuscinetto.

7.2 Schermatura elettrostatica parziale per la mitigazione delle correnti di cuscinetto in alta frequenza

L'efficacia delle tecniche di attenuazione della corrente di cuscinetto basate sull'isolamento (es. cuscinetti isolati o con sfere ceramiche) e/o messa a terra dell'albero del motore con spazzole di contatto elettrico sono state ben comprese ed utilizzate. Tuttavia, ci sono alcune tecniche di attenuazione di queste correnti che richiedono un ulteriore approfondimento.

In questo caso parliamo della tecnica di attenuazione proposta da Ferreira [17]; essa è costituita da una schermatura elettrostatica parziale (incassata in cava di statore) per ridurre l'accoppiamento elettrostatico tra gli avvolgimenti di statore del motore ed il rotore. Questa è composta da nastri / piastre / cunei isolati conduttivi (o con un film sottile conduttivo in una delle superfici) nelle aperture di cava di statore, tutti connessi a terra (Fig. 7.3), semplificando l'implementazione ed evitando correnti indotte nello schermo rispetto ad una schermatura elettrostatica di traferro lungo la superficie interna del nucleo di statore.

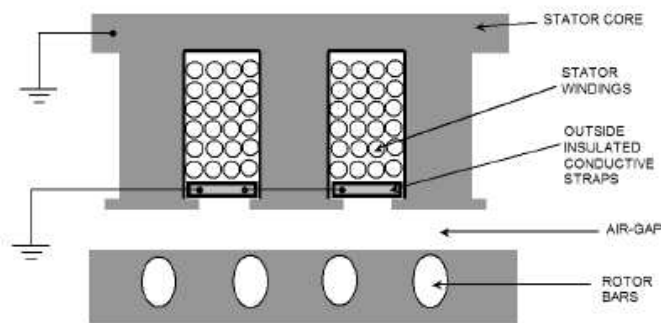


Fig. 7.3: concetto proposto della schermatura parziale incassata in cava di statore

Nei motori di grandi dimensioni, poiché le aperture di cava sono in generale sufficientemente più ampie per inserire una lunga piastra / cuneo con una superficie conduttiva, con la superficie esterna isolata con resina / vernice trasparente questo è facilmente realizzabile.

Tuttavia, per motori di dimensioni piccole/medie tale soluzione è difficile da implementare; perciò, al fine di dimostrare l'efficacia della PES proposta, è stato usato un approccio diverso, in cui un singolo o multipli conduttori di rame smaltati a sezione circolare sono introdotti nella cava più vicino possibile all'apertura, come rappresentato in Fig. 7.4.

In questa tecnica, sono possibili due configurazioni di conduttore di cava (vedi Fig. 7.4b), cioè:

- 1) conduttori separati per cava con tutte le estremità deviate in un lato e messe a terra;
- 2) un singolo conduttore di forma ondulata passante attraverso tutte le cave con una estremità messa a terra.

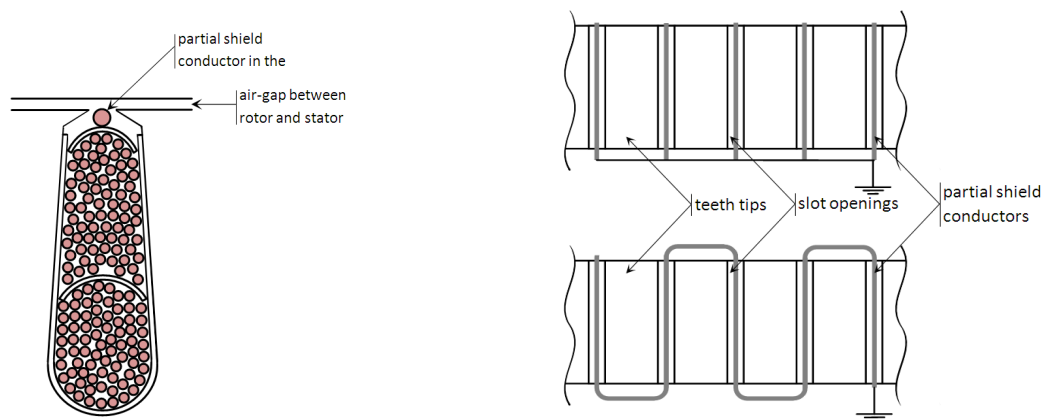


Fig. 7.4: a) rappresentazione semplificata di un conduttore a sezione circolare in una cava di statore
b) le due possibili configurazioni dei conduttori nelle cave: (sopra) soluz. 1; (sotto) soluz. 2

Per convalidare il concetto proposto è stata effettuata un'analisi FEM della PES ed al fine di testare sperimentalmente questa tecnica sono state eseguite prove a vuoto su un motore ad induzione di piccola potenza [17].

La PES è costruita mediante l'introduzione di un conduttore di rame a forma circolare per cava, più vicino possibile alla sua apertura, come rappresentato in Fig. 7.4a) ed è stata usata la configurazione nella parte superiore della Fig 7.4b), in cui le estremità dei conduttori in un lato sono deviate e connesse ad un cavo terminale esterno, permettendo alla PES di essere collegata o disconnessa dalla terra/massa.

I casi studiati sono:

- caso 1: motore ad induzione senza PES;
- caso 2 motore con PES non messa a terra;
- caso 3: motore con PES connessa a terra.

In Tabella 7.5 viene presentato un confronto tra le ampiezze dei picchi delle tensioni albero-terra (di modo comune) dopo l'introduzione di una PES nelle cave di statore non/oppure collegata a terra, dimostrando l'efficacia della soluzione/tecnica proposta.

L'introduzione di una PES non a terra (Caso 2) ha un impatto minore nei picchi di ampiezza della tensione di modo comune, sebbene modestamente contribuisca alla sua attenuazione. In tal caso, possono ancora verificarsi picchi potenzialmente pericolosi di questa tensione.

L'introduzione di una PES messa a terra (Caso 3) comporta una forte attenuazione dei picchi della tensione, come previsto, dimostrando la sua efficacia. In più, in questo caso, si ha un "effetto di filtraggio" che contribuisce alla riduzione della dv/dt della tensione.

SHAFT-GROUND VOLTAGE PEAKS MAGNITUDE ATTENUATION WITH PES.					
Case/Situation		Shaft-Ground Voltage Peaks Magnitude			
		extremely frequent values (V)	Variation (%)	maximum achieved values (V)	Variation (%)
Case 1	No PES	±11 V	--	±20 V	--
Case 2	Unearthed PES	±9 V	-18%	±18 V	-10%
Case 3	Earthed PES	±5 V	-55%	±8 V	-60%

Tabella 7.5

OSS: Va notato che parte della capacità parassita distribuita tra gli avvolgimenti di statore e il rotore è associata con l'estremità degli avvolgimenti di statore (o testate), che non è influenzata da questa tecnica proposta. Per un risultato più efficace, le testate devono essere ricoperte con un materiale conduttivo isolato adeguatamente messo a terra. Questa soluzione complementare è possibile ma piuttosto difficile da implementare.

Questa tecnica di attenuazione alternativa si basa sulla schermatura elettrostatica parziale incassata nelle cave di statore (PES) per ridurre l'accoppiamento elettrostatico tra gli avvolgimenti di statore ed il rotore. Sia l'analisi FEM che le prove eseguite su un motore ad induzione trifase confermano il concetto proposto.

Osservando la tabella si può concludere che la PES, se correttamente connessa a terra/a massa, può effettivamente ridurre (approssimativamente alla metà) i picchi della tensione albero-terra.

Il costo aggiuntivo associato alla sua implementazione è ben al di sotto dei cuscinetti isolati o delle spazzole di messa a terra dell'albero. In più, in termini di affidabilità, non ha influenza sulla robustezza e l'efficienza del motore, quindi è una buona soluzione per attenuare le correnti.

7.3 Prevenzione delle correnti EDM attraverso schermi elettrostatici nella sporgenza dell'avvolgimento di statore

Come visto, durante il normale funzionamento le piccole macchine in corrente alternata con potenze di alcuni kW alimentate con inverter di tensione a commutazione rapida sono probabili di subire danni ai cuscinetti a causa delle correnti di scarica elettrostatica EDM.

Queste correnti sono completamente eliminate se una gabbia di Faraday messa a terra viene inserita tra l'avvolgimento di statore e la superficie di rotore. Interrompendo l'accoppiamento capacitivo tra le due superfici di potenziale diverso, la gabbia di Faraday elimina le tensioni di cuscinetto. Questa gabbia è costituita da nastri di fogli di rame inseriti nelle cave di statore ed estesi alla sporgenza per comprendere l'estremità dell'avvolgimento di statore. Uno strato dielettrico isolante è applicato sui nastri di fogli conduttivi per fornire una protezione supplementare da una potenziale tensione di rottura tra le fasi dell'avvolgimento di statore e la gabbia di Faraday. A causa dei costi di produzione, la prevenzione di correnti EDM attraverso la tecnica della "gabbia di Faraday" non è utilizzata per le macchine standard in AC.

In questo paragrafo parliamo di una tecnica di attenuazione simile alla gabbia di Faraday ma come differenza, lo schermo elettrostatico è aggiunto solo nella sporgenza dell'avvolgimento di statore.

Come visto in precedenza, la tensione che si accumula ai capi del cuscinetto v_b è calcolata dalla tensione di modo comune ai terminali di statore v_{com} attraverso il circuito equivalente delle capacità di macchina:

$$v_b = BVR \cdot v_{com} \quad (7.3)$$

dove il partitore di tensione capacitivo è dato da:

$$BVR = \frac{v_b}{v_{com}} = \frac{C_{WR}}{C_{WR} + C_{RS} + C_{bDE} + C_{bNDE}} \quad (7.4)$$

Le capacità possono essere calcolate analiticamente oppure attraverso il metodo degli elementi finiti utilizzando il metodo dell'energia del campo elettrico.

Il valore di C_{WR} calcolato è circa 23.8 pF; quando si utilizza il metodo dell'energia [18] per il calcolo FEM 2D delle capacità del motore, si ottiene un valore molto più piccolo della capacità C_{WR} pari a circa 5.96 pF. La differenza è spiegata attraverso la distribuzione delle linee di campo elettrico nelle cave di statore e traferro, le quali mostrano che non tutta la lunghezza dell'apertura di cava deve essere considerata nel calcolo analitico.

Il valore calcolato di C_{RS} tramite la formula è 613.1 pF vicino al valore calcolato con il metodo FEM 2D che è 603.4 pF. Trascurando le capacità del cuscinetto, il BVR calcolato tramite C_{WR} e C_{RS} è pari a 3.7%, mentre il BVR calcolato attraverso il metodo FEM 2D risulta 0.98%. Se sono considerate le capacità del cuscinetto ad una velocità di 300 rpm (vedremo più avanti come si ricavano) il BVR decresce da 3.7% a 2.7% e da 0.98% a 0.7%.

Direttamente dalle misure di v_b e v_{com} il BVR è 2.5%. Questo è più vicino al valore analitico che al valore FEM; il calcolo analitico ha sovrastimato la capacità C_{WR} ed il calcolo FEM non ha considerato l'influenza dell'estremità dell'avvolgimento di statore. Perciò si suppone che questa influenza sia piuttosto importante sul BVR e non può essere trascurata!

Per cui, il calcolo FEM di C_{WR} deve considerare non solo la distribuzione delle linee di campo elettrico nelle cave di statore e nel traferro, ma anche il campo elettrico nella sporgenza.

Per le misure delle capacità di macchina e delle correnti EDM, gli scudi di un motore ad induzione standard di 1.5kW, 4 poli, sono stati sostituiti con scudi ricostruiti aventi sedi del cuscinetto isolate al DE a NDE. Un percorso conduttivo è fornito dal rotore allo statore attraverso conduttori di rame corti che bypassano gli strati isolanti. Questo percorso può essere facilmente interrotto e differenti configurazioni per le misure delle capacità di macchina possono essere ottenute.

La capacità del motore tra l'avvolgimento di statore e telaio C_{WS} può essere misurata con un misuratore RLC, da 1kHz a 10kHz. A queste frequenze, la macchina ha un comportamento capacitivo; poiché C_{WS} è molto più grande di C_{WR} gli effetti delle altre capacità possono essere trascurati e C_{WS} è approssimativamente uguale alla capacità misurata $C_{WS} \approx 4.07$ nF.

Le capacità C_{RS} e C_{WR} sono misurate simultaneamente con un misuratore connesso tra il telaio di statore e l'albero del rotore (Fig. 7.6). All'arresto, la capacità del cuscinetto è zero e poiché $C_{WS} \gg C_{WR}$:

$$C_{RS} + C_{WR} = C_{meas} - C_{ins,DE} - C_{ins,NDE} \quad (7.5)$$

dove C_{insDE} e C_{insNDE} sono le capacità degli strati isolanti del cuscinetto. Per ogni scudo, sono misurati separatamente: $C_{insDE} = 2.4$ nF e $C_{insNDE} = 2$ nF. Con la formula suddetta, la capacità $C_{RS} + C_{WR}$ che si ottiene da $C_{meas} = 5.2$ nF di Fig. 7.6 è pari a circa 0.8nF ed è più grande di quella calcolata $C_{RS} + C_{WR} = 0.63$ nF. L'errore è supposto essere dovuto al calcolo di entrambe le capacità. La capacità C_{WR} trascura gli effetti della sporgenza dell'avvolgimento e la capacità C_{RS} considera il rotore in posizione centrica. In realtà, all'arresto, il rotore ha una certa eccentricità (piccola, $\approx 10\%$); per cui la reale capacità C_{RS} è quasi il 25% più grande di quella calcolata.

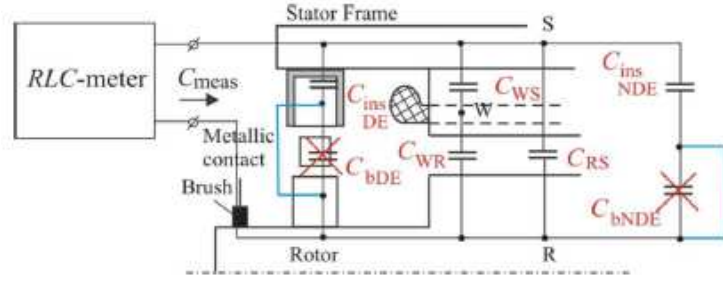


Fig. 7.6: misura delle capacità $C_{RS} + C_{WR}$: all'arresto, esiste un contatto metallico tra i rulli e gli anelli del cuscinetto, per cui C_{bDE} e $C_{bNDE} = 0$

La capacità del cuscinetto dipende dalle condizioni di funzionamento dello stesso: velocità, temperatura e carico. Quindi, le misure sono eseguite a differenti velocità, ma alla stessa temperatura (40°C) e lo stesso carico radiale per ogni cuscinetto. Un misuratore RLC è connesso tra l'albero e lo statore (Fig. 7.7). Gli strati isolanti al DE e NDE sono cortocircuitati: $C_{insDE} = 0$ e $C_{insNDE} = 0$. La velocità dell'albero è modificata con un motore di azionamento esterno. Dalla capacità misurata di Fig. 7.7 e da $C_{RS} + C_{WR}$, si estrae la capacità di un cuscinetto.

$$C_{bDE} + C_{bNDE} = C_{meas} - C_{RS} - C_{WR} \quad (7.6)$$

$$C_b = \frac{1}{2}(C_{bDE} + C_{bNDE}) \quad (7.7)$$

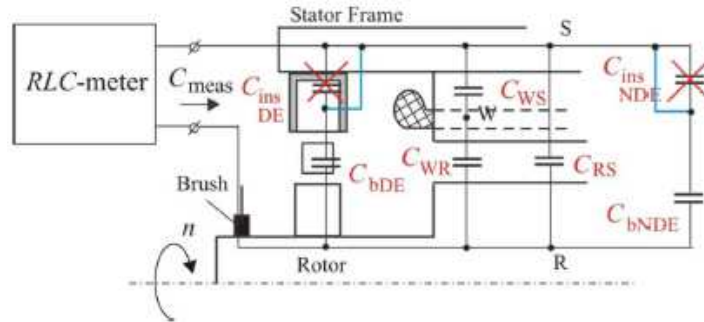


Fig. 7.7: misura della capacità del cuscinetto: l'albero del rotore è accoppiato ad un motore di azionamento esterno e ruota a diverse velocità n ; lo strato isolante è bypassato con un conduttore di rame, per cui $C_{insDE} = 0$, $C_{insNDE} = 0$

Il valore ottenuto di C_b è influenzato dalla corretta misura di $C_{RS} + C_{WR}$. Per $C_{RS} + C_{WR} = 0.8$ nF, la capacità del cuscinetto calcolata dalla formula suddetta è data in Fig. 7.8 rispetto alla velocità dell'albero. A temperatura e carico costante, la capacità del cuscinetto mostra un comportamento dipendente dallo spessore del lubrificante. A 300 rpm e 40°C la capacità di un cuscinetto è 130 pF; decresce non linearmente a 84 pF a 1500 rpm. La capacità misurata è usata per il calcolo del BVR.

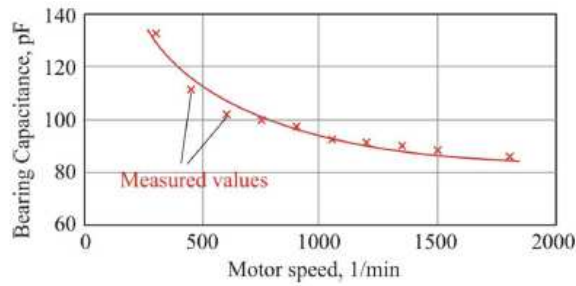


Fig. 7.8: capacità del cuscinetto misurata in funzione della velocità dell'albero a temperatura e carico radiale costante

Un'esatta modellazione FEM 3D dell'intera estremità dell'avvolgimento di statore è piuttosto complicata per i motori a bassa tensione, a causa della posizione e della forma degli avvolgimenti concentrici (Fig. 7.9). Poiché il calcolo FEM delle capacità è basato sul calcolo dell'energia del campo elettrico, l'esatta rappresentazione dell'estremità dell'avvolgimento è molto importante in prossimità dell'anello finale di rotore e della superficie del ferro. In quel punto il campo elettrico deve essere calcolato il meglio possibile. Assumendo la simmetria degli avvolgimenti di statore nella sporgenza, il modello FEM 3D dell'avvolgimento di statore è ridotto ad una singola cava di statore con la sua corrispondente parte nella sporgenza, contenente l'isolamento di cava e l'aria.

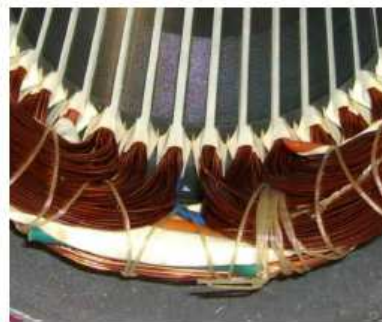


Fig. 7.9: estremità dell'avvolgimento di statore del motore ad induzione di 1.5kW

Risolvendo il problema di campo elettrostatico con FEM [18], questo fornisce le capacità di macchina C_{WS} , C_{WR} e C_{RS} per il volume suddetto considerato. Queste sono riportate in Tabella per la macchina di 1.5kW insieme ai valori calcolati.

-	<i>Analytical</i> [2]	<i>ANSYS 2D</i>	<i>ANSYS 3D</i>
C_{WS}/nF	3.9	9.49	9.58
C_{WR}/pF	23.8	5.96	27.36
C_{RS}/pF	613.1	603.4	607.7
<i>BVR</i>	2.7 %	0.7 %	3.0 %

Tabella: capacità della macchina calcolate e BVR

- La capacità C_{WS} , che è calcolata attraverso FEM 2D o 3D, è quasi 2.5 volte più grande di quella

misurata $C_{WS} \approx 4.07$ nF. La differenza è causata dalle ipotesi semplificatrici del modello FEM: la distanza tra la superficie del ferro e quella dell'avvolgimento di statore è considerata costante lungo la lunghezza circonferenziale a causa di un isolamento di spessore costante e la presenza di aria nelle immediate vicinanze dell'isolamento di cava è trascurata.

- Per qualsiasi metodo utilizzato: analitico, FEM 2D o 3D, la capacità C_{RS} ha quasi lo stesso valore, mentre la capacità C_{WR} mostra risultati diversi.

- Il calcolo analitico di C_{WR} trascura gli effetti terminali e non considera correttamente la distribuzione del campo elettrico nella cava; il FEM 2D fornisce solo la capacità tra l'avvolgimento di statore e la superficie di rotore nel traferro e nelle cave di statore $C_{WR} \approx C_{WR_slot} = 5.96$ pF.

Gli effetti dell'estremità sono solamente considerati attraverso il calcolo FEM 3D $C_{WR} = 27.36$ pF.

Dalla differenza delle due capacità ottenute con FEM si ottiene la capacità tra l'avvolgimento di statore e la superficie di rotore nella sporgenza:

$$C_{WR_ov} = C_{WR} - C_{WR_slot} = 3.6 \cdot C_{WR_slot} = 21.4 \text{ pF} \quad (7.8)$$

♦ Con l'aggiunta degli schermi elettrostatici messi a terra nella sporgenza, al fine di comprendere l'estremità dell'avvolgimento di statore (Fig. 7.10), il circuito equivalente delle capacità di macchina in alta frequenza diviene il circuito di Fig. 7.11. Tra l'avvolgimento di statore e la superficie di rotore, rimane soltanto la capacità del traferro e delle cave di statore C_{WR_slot} .

La capacità tra l'avvolgimento di statore ed il rotore nella sporgenza C_{WR_ov} è divisa in due capacità: 1) la capacità tra l'avvolgimento di statore e lo schermo elettrostatico C_{WSh} , che è aggiunta in parallelo a C_{WS} e 2) la capacità tra la superficie di rotore e lo schermo C_{RSh} , che è aggiunta in parallelo a C_{RS} . Quindi, per la macchina modificata abbiamo:

$$BVR = \frac{C_{WR_slot}}{C_{WR_slot} + C_{RS} + C_{RSh} + C_{bDE} + C_{bNDE}} \quad (7.9)$$

Le capacità di Fig. 7.11 sono calcolate attraverso FEM 3D. Il rapporto di tensione del cuscinetto è ridotto principalmente dalla diminuzione di C_{WR} da $C_{WR_slot} + C_{WR_ov} = 27.36$ pF a $C_{WR_slot} = 5.76$ pF.

Con lo schermo aggiunto nella sporgenza, il BVR è ridotto dal 3% a 0.6%, per cui 5 volte e così la tensione di cuscinetto.

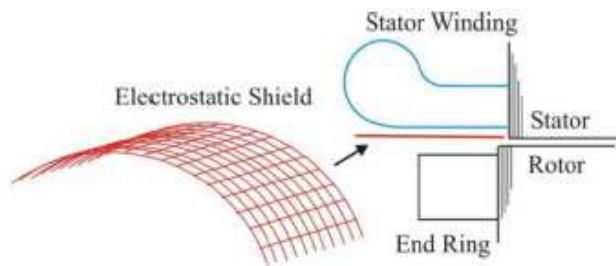


Fig. 7.10: aggiunta dello schermo elettrostatico nella sporgenza

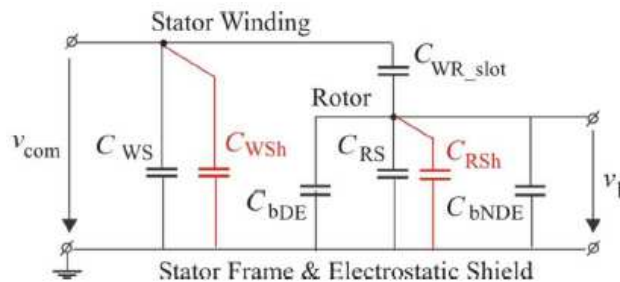


Fig. 7.11: circuito equivalente capacitivo in alta frequenza di una macchina con schermo elettrostatico protettivo nella sporgenza dell'avvolgimento di statore

Per dimostrare quanto detto una macchina standard di 1.5kW (Fig. 7.12) è stata preparata per le prove [18]. Sottili strati conduttivi di rame sono utilizzati nella sporgenza dell'avvolgimento di statore ad ogni lato della macchina.

- Senza l'utilizzo dello schermo elettrostatico nella sporgenza dell'avvolgimento di statore si verificano pericolose correnti EDM che possono distruggere i cuscinetti.



Fig. 7.12: macchina ad induzione di 1.5kW con schermi elettrostatici nella sporgenza

- Prove con la macchina modificata sono state eseguite solamente per un breve periodo e a vuoto. Con gli schermi aggiunti nella sporgenza, la tensione di cuscinetto è molto bassa; in tal caso, le correnti di scarica sono prevenute e solo innocue correnti capacitive dv/dt si verificano.

Per un motore ad induzione di piccola potenza, la capacità tra l'avvolgimento di statore ed il rotore nella sporgenza è 3.6 volte più grande di quella nelle cave di statore e nel traferro. Riduzioni del BVR sono possibili se uno schermo elettrostatico è utilizzato solo nella sporgenza dell'avvolgimento di statore. Il BVR è ridotto fino a 5 volte e le pericolose correnti EDM sono eliminate. Si conclude dunque che, per le macchine in AC alimentate con inverter, la sporgenza dell'avvolgimento di statore ha il maggior effetto sul verificarsi delle tensioni di cuscinetto e la generazione di correnti EDM.

7.4 Filtro EMI passivo per eliminare sia le correnti di cuscinetto che di terra

Nella classificazione delle correnti di cuscinetto si è visto che la corrente EDM è un'elevata corrente di scarica distruttiva istantanea che conduce a danni al cuscinetto. Perciò, questa corrente dovrebbe essere eliminata da un motore ad induzione azionato con inverter.

Abbiamo visto che esistono diverse soluzioni per attenuare le correnti di scarica EDM; una di queste tecniche è l'utilizzo di filtri di modo comune o componenti passivi/attivi per cancellare la tensione v_{com} presente ai terminali del motore, che appunto produce queste correnti.

Akagi e Tamura hanno proposto un filtro dell'interferenza elettromagnetica (EMI) passivo [19] che richiede accesso al punto neutro del motore non messo a terra e che può tenere sotto controllo sia la tensione sull'albero che la corrente di dispersione verso terra.

La Fig. 7.13 mostra la configurazione circuitale del sistema di prova; essa è importante ed unica in quanto gli avvolgimenti di statore trifase sono utilizzati come parte del filtro passivo. Questo lo rende più piccolo in dimensioni e più efficace nel filtraggio.

E' composta da un inverter PWM a tre livelli con una frequenza di commutazione di 8kHz, un motore ad induzione di 3.7kW alimentato a 400 V ed un filtro passivo EMI. Il filtro EMI deve essere installato il più vicino possibile ai terminali di uscita in corrente alternata dell'inverter.

Questo è composto da un filtro di modo comune ed un filtro di riduzione della dv/dt di piccole dimensioni. Il filtro di modo comune è costituito da un induttore di modo comune L_C inserito tra l'inverter ed il motore ed un resistore R_C che è posto tra il punto neutro del motore non messo a terra ed il punto medio di due condensatori in corrente continua frazionati C_C .

Il filtro di riduzione della dv/dt è composto da tre induttori di modo differenziale L_D e tre condensatori connessi a stella C_D come mostrato in Fig. 7.13. Un resistore di smorzamento R_D è posto ai capi degli induttori serie L_D . Il punto neutro dei tre condensatori C_D è collegato al punto medio del link-dc M, per cui da un piccolo contributo ad attenuare le componenti in alta frequenza della tensione di modo comune che appare ai terminali del motore. Quando si verifica una variazione di tensione con un valore elevato della dv/dt ad ogni commutazione, l'induttore ed il resistore connessi in parallelo agiscono come un resistore. La combinazione del resistore e del condensatore formano un filtro passa-basso del primo ordine, riducendo quindi in modo significativo il valore della dv/dt .

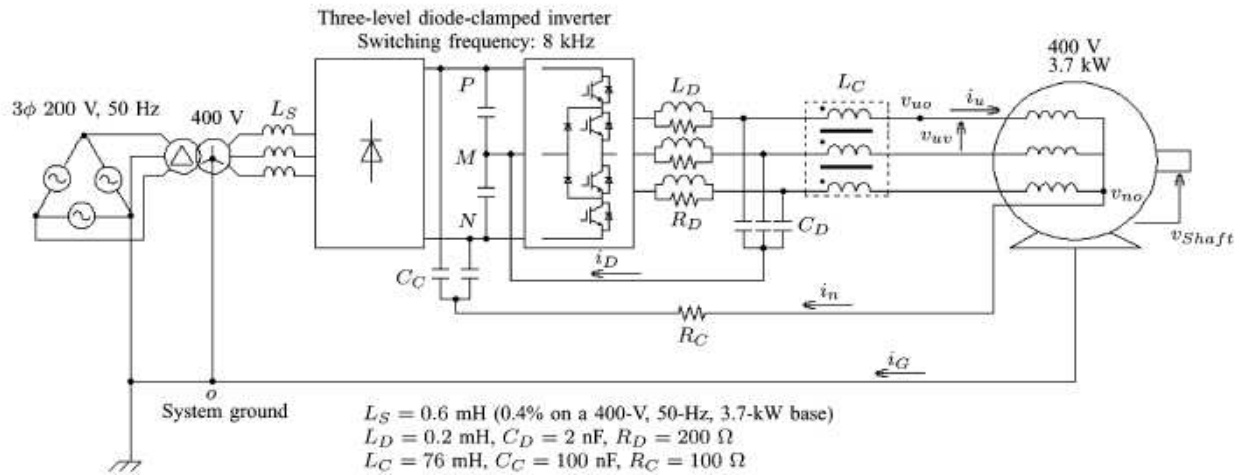


Fig. 7.13: filtro EMI passivo con accesso al punto neutro del motore non messo a terra e sistema di prova

La Fig. 7.14 illustra la costruzione fisica del motore che è stato testato per osservare la corrente di cuscinetto i_B . Anelli isolati isolano i due cuscinetti a sfera sul drive-end e sul non drive-end dal telaio del motore. Un filo è disponibile per cortocircuitare un anello esterno del cuscinetto al telaio. Questo stimola il normale funzionamento e fornisce un meccanismo per misurare i_B . Un tappeto di gomma per isolamento elettrico è inserito tra il motore ed il pavimento. Questo permette la misura corretta della corrente verso terra i_G . Nessun carico è connesso al motore ed il telaio è collegato direttamente al sistema di messa a terra o ; inoltre l'inverter è isolato, in quanto non c'è alcun collegamento elettrico tra il suo telaio ed il sistema di terra.

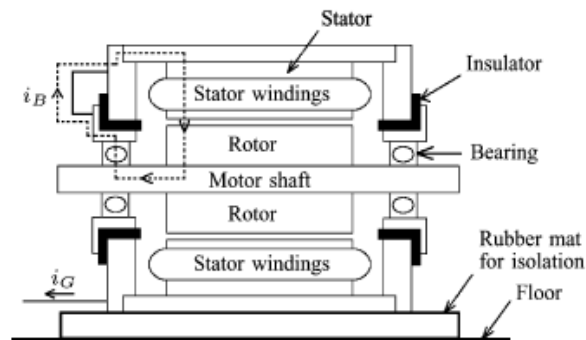


Fig. 7.14: struttura del motore per osservare la corrente i_B

La tensione di modo comune prodotta dall'inverter v_{Cinv} è composta da due componenti (Fig. 7.15): la prima è la frequenza di commutazione (8kHz) mentre la seconda componente si riferisce alla frequenza tripla di uscita dell'inverter. Come si nota, il valore di picco della tensione di modo comune è più grande o più piccolo a seconda di quanto vale la frequenza di uscita dell'inverter.

La forma d'onda della tensione di modo comune dipende fortemente dai metodi di modulazione che si utilizzano e dai punti di funzionamento; nell'esperimento è stato utilizzato un controllo

PWM basato sulla space vector modulation (svm). Quando è applicata una modulazione convenzionale seno-triangolo senza iniezione di terza armonica all'inverter a tre livelli, la tensione di modo comune può essere significativamente ridotta nella regione di bassa frequenza. Comunque, l'inverter ha lo svantaggio di produrre una tensione ad impulso con una larghezza estremamente piccola.

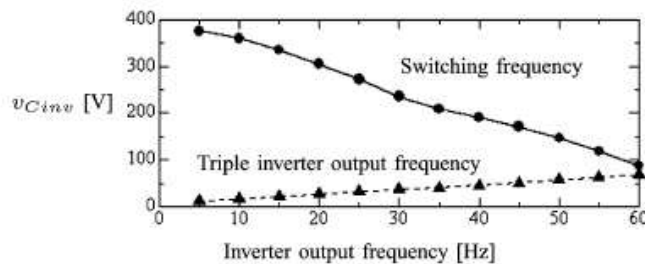
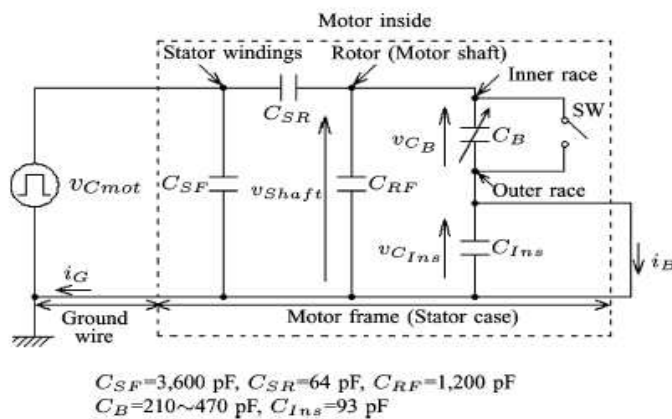


Fig. 7.15: tensioni di modo comune (valori di picco)

Il circuito equivalente delle capacità parassite del motore ad induzione ed i suoi valori sono []:



Questo può essere utilizzato per identificare la corrente di cuscinetto e la corrente di dispersione verso terra.

1) Quando nessun guasto dielettrico si verifica nei film di grasso, l'interruttore SW si può pensare che rimanga nello stato off. Sotto queste condizioni, la tensione di modo comune prodotta dall'inverter v_{Cinv} agisce come una forza motrice per formare i seguenti loop di corrente:

- loop di corrente I: $v_{Cinv} \rightarrow$ avvolgimenti di statore $\rightarrow C_{SF} \rightarrow$ telaio \rightarrow filo di terra $\rightarrow v_{Cinv}$;
- loop di corrente II: $v_{Cinv} \rightarrow$ avvolgimenti di statore $\rightarrow C_{SR} \rightarrow C_{RF} \rightarrow$ telaio \rightarrow filo di terra $\rightarrow v_{Cinv}$;
- loop di corrente III: $v_{Cinv} \rightarrow$ avvolgimenti di statore $\rightarrow C_{SR} \rightarrow$ rotore \rightarrow albero $\rightarrow C_B \rightarrow$ filo di terra $\rightarrow v_{Cinv}$.

Questi tre loop di corrente passano attraverso il filo di terra e perciò la loro somma corrisponde alla corrente di dispersione verso terra. Fra i tre, il loop di corrente I è il più importante, perché il valore della capacità C_{SF} è molto più grande delle altre. Il loop III è proprio la corrente di cuscinetto dv/dt .

2) Quando si verifica un guasto dielettrico nei film, l'interruttore SW è chiuso. Poiché C_{SR} è molto più piccola di C_{RF} , quest'ultima capacità agisce come forza motrice, formando quindi il quarto loop di corrente.

- loop di corrente IV: $C_{RF} \rightarrow \text{rotore} \rightarrow \text{albero} \rightarrow \text{SW} \rightarrow \text{telaio} \rightarrow C_{RF}$.

↓

Un' elevata corrente di impulso distruttiva scorre nel loop di corrente IV come conseguenza di aver scaricato la carica elettrica immagazzinata in C_{RF} . Questa è la corrente di cuscinetto EDM all'interno del motore. E' interessante notare che nessuna corrente di cuscinetto EDM scorre nel filo di terra. In altre parole, la corrente di scarica è indipendente dalla corrente di dispersione verso terra.

Il circuito soprastante differenzia chiaramente le tre soluzioni esistenti per eliminare la corrente di cuscinetto da un motore azionato con inverter, basate sui rispettivi principi di manifestazione:

→ la prima soluzione utilizza lo “schermo elettrostatico” (Faraday) nel motore ad induzione che è capace di realizzare un isolamento elettrico tra lo statore ed il rotore. Questa struttura speciale del motore rende estremamente piccolo il valore di capacità di C_{SR} . Ciò significa che gli avvolgimenti di statore sono disconnessi dal rotore. Per cui, nessuna tensione appare ai capi del cuscinetto C_B .

→ la seconda soluzione installa una “spazzola di messa a terra” dell'albero. Questa forma un cortocircuito ai capi di C_{RF} . Per cui, nessuna carica elettrica è immagazzinata in questa capacità, così che nessun guasto dielettrico si verifica nei film di grasso.

→ la terza soluzione usa i cosiddetti “cuscinetti ibridi” invece di cuscinetti convenzionali. Per cui, nessuna corrente scorre nei loop di corrente III e IV. Queste tre soluzioni esistenti non producono effetto sulla riduzione della più dominante corrente di dispersione verso terra che scorre attraverso C_{SF} , sebbene possono eliminare la corrente di cuscinetto dal motore azionato con inverter.

♦ La soluzione proposta è basata sulla semplice idea che il filtro passivo EMI può eliminare la tensione di modo comune v_{Cmot} dai terminali del motore. Questo significa che nessuna sorgente di tensione esiste nel circuito suddetto, cioè $v_{Cmot} = 0$. Per cui nessuna corrente scorre nel circuito.

La Tabella riassume i risultati sperimentali [19] ottenuti ad una frequenza di 10Hz utilizzando le varie configurazioni di filtro EMI. Quando nessun filtro viene collegato si verifica una corrente con un valore di picco di circa 1A; questa è una corrente di cuscinetto EDM. Il filtro di modo comune con accesso al punto neutro del motore non messo a terra gioca un ruolo essenziale, non solo nel ridurre sia i valori di picco che efficaci di i_G , ma anche nell'eliminare il guasto elettrico dei film di grasso lubrificanti dai cuscinetti ad entrambe le estremità.

Quando il filtro di modo comune è collegato, nessuna corrente EDM scorre sebbene una corrente dv/dt di 48 mA fluisce come i_B . Il filtro di riduzione della dv/dt è efficace nel ridurre la corrente da 48 mA a 28 mA.

Experimental waveforms	i_G		i_B	v_{uo}
	peak [mA]	rms [mA]	peak [mA]	dv/dt [V/ μ s]
no filter	470	79	960	3,700
dv/dt	260	83	890	250
L_C	198	26	700	670
CMF	176	10	48	800
dv/dt and CMF	76	8	28	270

Tabella

Quando nessun filtro viene utilizzato, la tensione dell'albero v_{Shaft} è determinata dalla tensione di modo comune dell'inverter v_{Cinv} e dal parallelo di C_B e C_{RF} . Come visto in precedenza, la componente della frequenza di commutazione (8kHz) compresa in v_{Cinv} decresce da circa 370 V fino a 90 V come la frequenza di uscita dell'inverter aumenta da 10Hz a 60Hz. Questa tendenza indica che si verificano meno guasti dielettrici nei film di grasso come la velocità del motore diviene più alta perché la dipendenza dalla velocità di C_B produce piccoli effetti sul parallelo di C_B e C_{RF} .

Per cui, se ad esempio l'inverter viene azionato a 40Hz nessun guasto elettrico si verifica; nessuna corrente di cuscinetto EDM scorre sebbene una piccola corrente di cuscinetto dv/dt fluisce come i_B .

Tuttavia, la corrente di picco è più grande di 48 mA e di 28 mA mostrate in tabella.

Questo significa che non solo il filtro di riduzione della dv/dt ma anche il filtro di modo comune da un importante contributo alla riduzione della corrente di cuscinetto.

Il filtro EMI passivo che abbiamo visto elimina sia la corrente di cuscinetto che la corrente di dispersione verso terra da un motore ad induzione azionato con inverter.

I risultati possono essere riassunti come segue:

- *La corrente di cuscinetto EDM che può danneggiare gravemente i cuscinetti al drive-end e al non drive-end circola all'interno del motore e non scorre nel filo di terra. In altre parole, la corrente di scarica è indipendente dalla corrente di terra.*
- *Il filtro di riduzione della dv/dt non può eliminare la corrente di cuscinetto EDM da un motore azionato con inverter, sebbene possa ridurre la dv/dt .*
- *Il filtro passivo EMI è valido ed efficace nell'eliminare le correnti di cuscinetto EDM e dv/dt , nonché la corrente di dispersione verso terra, dal motore azionato con inverter.*

8. REGOLE PRATICHE PER LA VALUTAZIONE DELLA CORRENTE DI CUSCINETTO

In pratiche applicazioni nel campo, molti parametri del sistema di azionamento possono essere sconosciuti; in questo contesto, una modellazione dettagliata può essere impossibile.

Perciò, viene proposto un diagramma di flusso che può servire come uno strumento per stimare il danneggiamento di un azionamento a causa di correnti di cuscinetto indotte da un inverter e riassume i possibili mezzi per prevenire danni o guasti [20].

I diversi parametri studiati sono riassunti in Fig. 8.1.

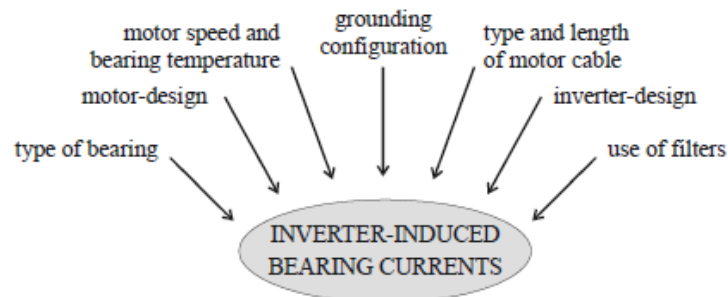


Fig. 8.1: parametri investigati di un sistema di azionamento a velocità variabile

A causa delle diverse catene causa – effetto dei diversi tipi di corrente di cuscinetto, non è un singolo parametro del sistema di azionamento ma l'interazione di differenti parametri che può causare il flusso di queste correnti indotte da un inverter ed eventualmente può portare a danni al cuscinetto.

Il diagramma di flusso si basa sulla forte influenza di (a) *configurazione di messa a terra del rotore* e (b) *dimensione del motore* sul tipo di corrente di cuscinetto che potrebbe verificarsi.

Poiché i fenomeni di correnti di cuscinetto indotte da un inverter sono diversi, le tecniche di attenuazione devono essere usate selettivamente.

♦ **Configurazione di messa a terra del rotore** (Passo 1) (Fig. 8.2): la configurazione di messa a terra del rotore è il primo parametro di influenza considerato, perché *determina se possono fluire pericolose correnti di terra*.

Se il rotore non è messo a terra, il diagramma deve continuare al passo 2. Altrimenti, il tipo di cavo del motore, schermato o non schermato, è di importanza. Se viene utilizzato un cavo del motore schermato e correttamente connesso sia lato inverter che motore, l'impedenza dello statore è generalmente abbastanza bassa che difficilmente scorre qualsiasi corrente di terra di rotore.

Se la messa a terra del rotore non può essere eliminata ed un cavo del motore schermato non può essere utilizzato, o se il cavo schermato del motore è lungo diversi centinaia di metri, devono

essere applicate tecniche di attenuazione per le correnti di cuscinetto a causa di correnti di terra di rotore. Altrimenti, il diagramma di flusso può continuare al passo 2.

♦ **Influenza della dimensione del motore** (Passo 2) (Fig. 8.3): la dimensione del motore determina fortemente se correnti *EDM* o *circolanti* sul cuscinetto possono verificarsi. Questa forte importanza della dimensione del motore è dovuta al fatto che la tensione indotta lungo l'albero del motore v_{sh} che può causare il flusso di correnti circolanti aumenta con il cubo della dimensione del telaio del motore H :

$$v_{sh} = i_g \cdot l_{Fe} \sim H^2 \cdot H = H^3 \quad (8.1)$$

dove la dimensione del telaio H è definita come la distanza tra la parte inferiore della base dell'alloggio del motore e la parte centrale dell'albero. La v_{sh} è proporzionale alla corrente i_g e alla lunghezza del nucleo di statore l_{Fe} , dove quest'ultimo è proporzionale alla dimensione della macchina. La corrente di modo comune i_g è approssimativamente proporzionale alla capacità C_{wf} , che è proporzionale al quadrato di H .

Se non scorre nessuna corrente di terra di rotore, per piccoli motori con altezze dell'albero al di sotto di circa 100 mm, solo *correnti di tipo EDM* si verificano. Con motori più grossi con dimensioni del telaio sopra 280 mm, dominano le *correnti circolanti*, dove le ampiezze più grandi si verificano a basse velocità del motore. Entrambi i tipi di corrente possono verificarsi nei motori con altezze d'albero tra 100 e 280 mm, ma la tendenza generale è un aumento delle correnti circolanti sul cuscinetto con la dimensione del telaio.

L'ampiezza della corrente circolante sul cuscinetto $i_{bcir,max}$ può essere stimata dalla corrente di terra i_g del motore. Questo è stato fatto nel passo 3 del diagramma di flusso.

La situazione è diversa nel caso di correnti di cuscinetto EDM, dove ulteriori calcoli richiedono una conoscenza dettagliata di molti parametri dell'azionamento. Generalmente, il danneggiamento dei cuscinetti è probabile che aumenti con la riduzione della dimensione del motore a causa della diminuzione dell'area di contatto A_H nei cuscinetti.

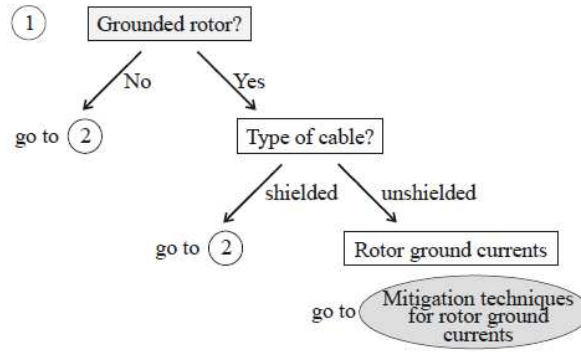


Fig. 8.2: diagramma di flusso riguardante la **configurazione di messa a terra del rotore** (Passo 1)

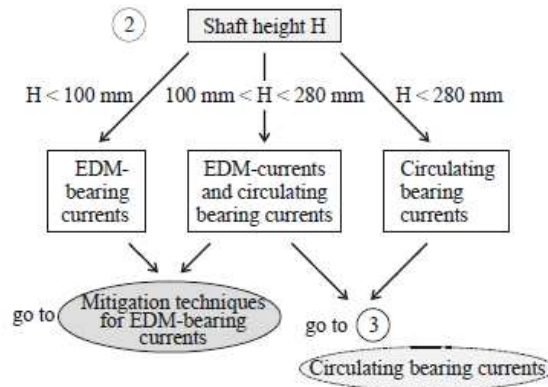


Fig. 8.3: diagramma di flusso riguardante l'**influenza della dimensione del motore** (Passo 2)

♦ **Stima dell'ampiezza della corrente circolante sul cuscinetto** (Passo 3) (Fig. 8.4): Essendo la corrente di terra i_g la forza motrice della corrente circolante sul cuscinetto, la corrente $i_{bcir,max}$ può essere stimata dall'ampiezza della corrente di terra $i_{g,max}$.

A tal scopo, dal circuito equivalente derivato dal modello analitico comprendente anche l'influenza di cuscinetti isolati elettricamente di diversi spessori [10], sono ricavati i limiti superiori della corrente di cuscinetto in funzione della corrente di terra in alta frequenza come segue:

- due cuscinetti convenzionali

$$i_{bcir, max} \leq 0.4 \cdot i_{g,max} \quad (8.2)$$

- un cuscinetto isolato, uno convenzionale

$$i_{bcir, max} \leq 0.2 \cdot i_{g,max} \quad (8.3)$$

- due cuscinetti isolati

$$i_{bcir, max} \leq 0.1 \cdot i_{g,max} \quad (8.4)$$

- uno o due cuscinetti ibridi

$$i_{bcir} \approx 0 \quad (8.5)$$

Va notato che queste relazioni sono limiti superiori ed i rapporti $i_{bcir,max} / i_{g,max}$ sono spesso più piccoli.

Se l'ampiezza della corrente di terra $i_{g,max}$ è sconosciuta, deve essere misurata da esperti oppure stimata, altrimenti deve essere considerato l'uso di tecniche di attenuazione per le correnti circolanti sul cuscinetto.

♦ **Stima dell'ampiezza della corrente di terra** (Fig. 8.5): l'ampiezza della corrente di terra dipende fortemente dalla capacità tra l'avvolgimento di statore ed il telaio C_{wf} e dalla dv/dt della tensione linea-terra v_{Lg} ai terminali del motore. Il valore di C_{wf} può essere misurato oppure stimato attraverso:

$$C_{wf} = 0.0024 H^2 - 0.0039 \cdot H + 2.2 \quad (8.6)$$

dove: C_{wf} è espressa in nF ed H è l'altezza dell'albero in mm.

Se il valore di dv_{Lg}/dt della tensione linea-terra non è noto, è necessario misurarlo o stimarlo. L'esatto calcolo della corrente di modo comune è difficile, poiché il comportamento in alta frequenza della macchina deve essere conosciuto. Tuttavia, è sufficiente una stima del suo valore.

Sono distinti i casi con dv_{Lg}/dt più grande, uguale o più piccolo di 0.5 kV/μs.

Nel caso di $dv_{Lg}/dt > 0.5$ kV/μs, si distingue tra cavi del motore “elettricamente lungo” e “elettricamente corto”. Un cavo è considerato “elettricamente lungo”, se la sua lunghezza l_c è maggiore o uguale alla “lunghezza critica del cavo” $l_{c,crit}$, $l_c \geq l_{c,crit}$; questa è data dalla velocità delle onde elettromagnetiche nel cavo (velocità di cavo) v_{cable} ed il tempo di salita dell'impulso di tensione t_r :

$$l_c = v_{cable} \frac{t_r}{2} \quad (8.7)$$

dove il valore della velocità di cavo è circa $150 \cdot 10^6$ m/s.

Quindi l'ampiezza della corrente di terra $i_{g,max}$ può essere stimata come segue []:

- $dv_{Lg}/dt > 0.5$ kV/μs:
- cavo del motore elettricamente lungo

$$i_{g,max} \leq 1.5 \cdot 2/3 \cdot dv_{Lg}/dt \cdot C_{wf} \quad (8.8)$$

- cavo del motore elettricamente corto

$$i_{g,max} \leq 1.5 \cdot dv_{Lg}/dt \cdot C_{wf} \quad (8.9)$$

• $dv_{Lg}/dt < 0.5 \text{ kV}/\mu\text{s}$:

$$i_{g,max} \leq 2 \cdot dv_{Lg}/dt \cdot C_{wf} \quad (8.10)$$

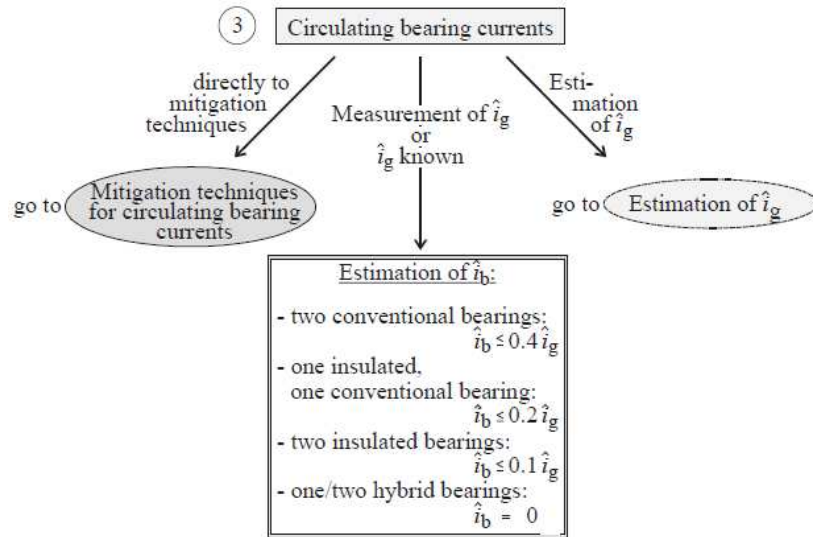


Fig. 8.4: diagramma di flusso riguardante la **stima dell'ampiezza della corrente circolante sul cuscinetto** (Passo 3)

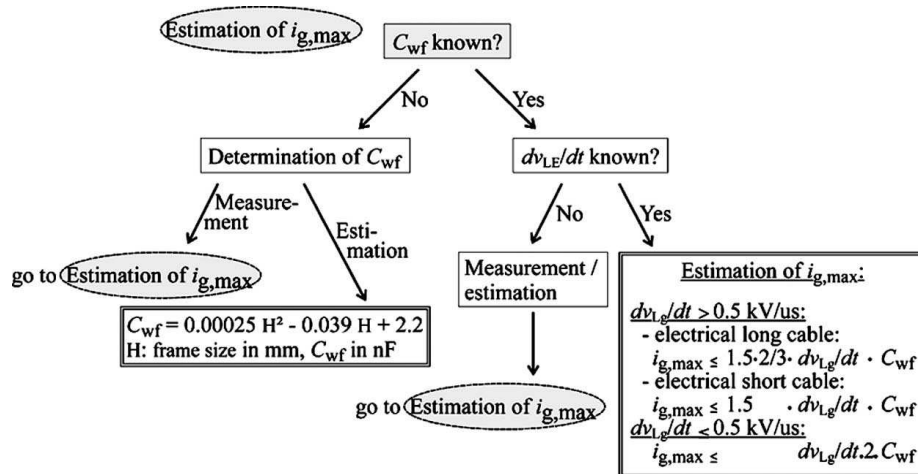


Fig. 8.5: diagramma di flusso riguardante la **stima dell'ampiezza della corrente di terra**

♦ *Tecniche di attenuazione per i diversi tipi di corrente di cuscinetto indotte dall'inverter*

Poiché le catene causa – effetto dei diversi fenomeni di corrente di cuscinetto sono differenti, le tecniche di attenuazione devono essere scelte secondo il tipo di corrente di cuscinetto che deve essere ridotta o eliminata. La fonte comune di tutte le correnti di cuscinetto indotte da un inverter è la tensione di modo comune dell'inverter stesso. Per cui tutte le tecniche di attenuazione che eliminano la tensione di modo comune eliminano questo tipo di correnti.

- Anche spazzole e grasso conduttivo per cuscinetto sono stati proposti per ridurre le correnti di cuscinetto EDM. Comunque, la manutenzione delle spazzole al fine di avere un buon contatto elettrico alle alte frequenze può essere difficile. In modo simile, deve essere assicurato che anche il grasso lubrificante conduttivo abbia adeguate proprietà meccaniche.

- I cuscinetti diversi da quelli convenzionali di acciaio, come quelli ibridi o ceramici, eliminano tutte le correnti di cuscinetto indotte dall'inverter, perché l'intero diametro dell'elemento rotante è elettricamente isolante. Fornisce un'impedenza nei percorsi della corrente di cuscinetto che è abbastanza elevata per eliminare completamente queste correnti.

- Cuscinetti elettricamente isolati con sufficiente spessore dello strato isolante (almeno 250 μm) possono effettivamente ridurre le correnti circolanti sul cuscinetto e le correnti dovute alle correnti di terra di rotore, ma non le correnti EDM.

- I filtri che non eliminano la tensione di modo comune possono attenuare le correnti circolanti e quelle derivanti da correnti di terra di rotore, ma non le correnti di scarica.

La Fig. 8.6 riassume diverse tecniche di attenuazione per diversi tipi di correnti di cuscinetto indotte dall'inverter.

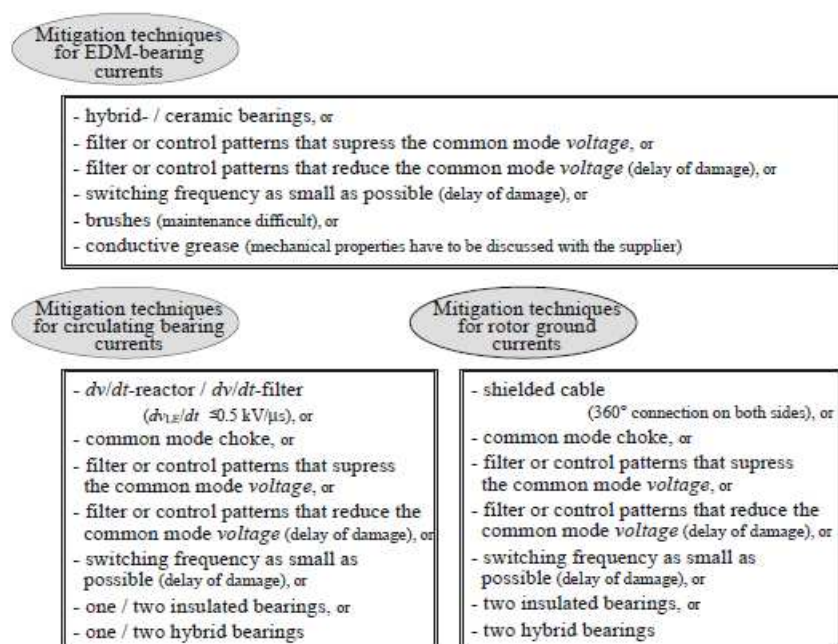


Fig. 8.6: tecniche di attenuazione per i diversi tipi di correnti di cuscinetto

Il diagramma di flusso proposto può servire come uno strumento per valutare il danneggiamento dei cuscinetti dovuto a correnti indotte da un inverter dove molti parametri di un azionamento sono sconosciuti.

Prima di tutto, la configurazione di messa a terra del rotore è classificata al fine di determinare se possono scorrere correnti di cuscinetto dovute a correnti di terra di rotore. Dopo, è considerata la dimensione del motore, perché questo determina ampiamente il tipo di possibile corrente di cuscinetto che si verifica (EDM o circolante).

Questo è seguito da una valutazione dell'ampiezza della corrente circolante sul cuscinetto come funzione della corrente di terra. Viene fornita anche una regola generale per la stima della corrente di terra.

Alla fine, il diagramma riassume anche i possibili mezzi per prevenire danni ai cuscinetti.

9. CONCLUSIONI

L'esistenza delle correnti di cuscinetto indotte dall'inverter è dovuta alla tensione di modo comune (centro-stella) presente all'uscita dell'inverter di alimentazione che, unitamente alle capacità parassite che si trovano all'interno del motore, causa questo fenomeno. Abbiamo visto che esistono quattro tipi di corrente di cuscinetto:

- **correnti di cuscinetto capacitive**
- **correnti di scarica elettrostatica (EDM)**
- **correnti circolanti sul cuscinetto**
- **correnti di terra di rotore**

I valori assoluti delle correnti di cuscinetto non sono l'appropriata misura per valutare il danneggiamento dei cuscinetti di un motore dovuto a tali correnti, dato che questi dipendono da diversi parametri come le dimensioni del motore o il campo di applicazione; per cui il danneggiamento è correlato alla "densità di corrente apparente" del cuscinetto assumendo come soglia convenzionale al guasto 0.1 A/mm^2 .

Dopo aver fornito una spiegazione delle tecniche di misura dei parametri che sono correlati alle correnti di cuscinetto abbiamo visto come si calcolano le diverse capacità di accoppiamento del motore, fornendo anche un confronto con i risultati riportati da studi sperimentali su motori da 11kW a 500kW di potenza; inoltre sono proposti modelli del fenomeno che forniscono sia spiegazioni fisiche che l'impatto delle tecniche di misura sulle correnti di cuscinetto, i quali mostrano una certa differenza tra quelle misurate e che realmente si verificano al suo interno.

In più, risultati di studi che sono stati effettuati nel corso degli ultimi anni ed un'analisi derivante da un ricerca di laboratorio mostrano l'influenza di diversi parametri nelle stesse identiche condizioni su motori di potenza nominale fino a 500kW. I parametri esaminati sono dimensione e velocità del motore, temperatura di cuscinetto, combinazioni inverter-motore, tipo di cavo del motore e lunghezza. I risultati mostrano che l'importanza dei differenti fenomeni di corrente di cuscinetto varia in particolare con le dimensioni del motore e le configurazioni di messa a terra. Di conseguenza devono essere scelte selettivamente anche diverse tecniche di attenuazione che sono applicate per ridurre o eliminare questo tipo di correnti; in particolare abbiamo visto cosa accade con funzionamento con filtri e con l'utilizzo di cuscinetti isolati e cuscinetti ibridi, che sono le tecniche di attenuazione più comuni.

Viene fornita anche una descrizione ed una valutazione di tecniche di attenuazione alternative/innovative che sono state proposte negli ultimi anni.

Infine, poiché molti parametri dell'azionamento potrebbero essere sconosciuti, un'adeguata modellazione può non sempre essere applicabile. Quindi viene proposto un diagramma di flusso per stimare il danneggiamento dovuto alle correnti di cuscinetto indotte da un inverter, dove appunto la conoscenza dei diversi parametri di progetto non è disponibile.

Il diagramma riassume anche le possibili tecniche di attenuazione per prevenire danni.

Bibliografia

- [1] H. Pittroff, "Waelzlager im elektrischen Stromkreis", Elektrische Bahnen, vol. 39, 1968
- [2] Waelzlager in elektrischen Maschinen und Geraeten, SKF-Druckschrift, 3rd edition, Schweinfurt, 1966
- [3] Waelzlager in Elektromaschinen und in der Buerotechnik, FAG-Druckschrift, Schweinfurt, 1989
- [4] G. Kure and W. Palmethofer, "Stromisolierte Waelzlager", vol. 3, 1996
- [5] D. Busse, J. Erdman, R. Kerkman, D. Schlegel, and G. Skibinski, "System electrical parameters and their effect on bearing currents", IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 33, 1997
- [6] A. Binder and A. Muetze, "Scaling effects of inverter induced bearing current in AC machines", IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 44, no.3, June 2008
- [7] A. Muetze and A. Binder, "Techniques for measurement of parameters related to inverter-induced bearing current", IEEE Transactions on Industry Applications, vol.43, no.5, October 2007
- [8] A. Muetze and A. Binder, "Calculation of motor capacitances for prediction of the voltage across the bearings in machines of inverter-based drive system", IEEE Transactions on Industry Applications vol.43, June 2007
- [9] A.Muetze and A. Binder, "Techniques for measurement of parameter related to inverter-induced bearing current", IEEE Transactions on Industry Applications, vol.43, October 2007
- [10] A. Muetze and A.Binder, " Calculation of influence of insulated bearings and insulated inner bearing seats", IEEE Transactions on Industry Applications, vol.42, July 2006
- [11] Chen, Lipo, Fitzgerald, "Modeling of bearing currents in inverter drives" IEEE Transactions on Industry Applications, 1996
- [12] Hausberg V, Electrical Engineering 2000
- [13] A. Muetze and A. Binder, " Systematic approach to bearing current investigation in variable speed drive system" European Transactions on Electrical Power, 2005
- [14] A. Muetze and A. Binder, "Experimental evaluation of mitigation techniques for bearing currents in inverter-supplied drive-systems", IEEE Transactions on Industry Applications, 2003
- [15] A. Muetze, "Scaling issues for common-mode chokes to mitigate ground currents in inverter-based drive systems", IEEE Transactions on Industry Applications, vol.45, no.1, February 2009
- [16] A. Muetze and William Oh, "Application of static charge dissipation to mitigate electric discharge bearing currents", IEEE Transactions on Industry Applications, vol.44, no.1, February 2008

- [17] Fernando J.T. Ferreira, Cistelecan and Anibal de Almeida, "Slot-embedded partial electrostatic shield for high-frequency current mitigation in inverter-fed induction motors", International Conference on Electrical Machines (ICEM), 2010
- [18] O. Magdun, Y. Gemeinder, A. Binder, "Prevention of harmful EDM currents in inverter-fed AC machines by use of electrostatic shields in the stator winding overhang", IEEE Transactions on Industry Applications, 2010
- [19] H. Akagi and S. Tamura, "A passive EMI filter for eliminating both bearing current and ground leakage current from an inverter-driven motor", IEEE Transactions on Power Electronics, vol.21, no.5, September 2006
- [20] A. Muetze and A. Binder, "Practical rules for assessment of inverter-induced bearing currents in inverter-fed AC motors up to 500kW", IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 54, no.3, June 2007